

El clima futuro

John Gribbin

Biblioteca
Científica
Salvat

El clima futuro

John Gribbin

SALVAT

Versión española de la obra original inglesa
Future Weather, de John Gribbin

Traducción: Dr. Manuel Puigcerver Zanón
Diseño de cubierta: Ferran Cartes/Montse Plass

Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com
Edición digital: Sargont (2018)

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8955-9 (Volumen 75)
Depósito Legal: B-37491-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A.. Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a.. Diciembre 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

A Hubert Lamb

Así vivieras en tiempos interesantes

Maldición china

AGRADECIMIENTOS

Este es un libro sobre el efecto invernadero, es decir, sobre la posibilidad de que un aumento de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera dé como resultado un calentamiento de la Tierra. Pero, asimismo, trata de los cambios climáticos en general, ya que la influencia de las actividades del hombre sobre el tiempo atmosférico sólo puede apreciarse en su justo valor si se tienen en cuenta las variaciones naturales del clima en nuestro planeta. Lo poco que yo sé acerca de este amplísimo tema lo he aprendido a lo largo de más de diez años como periodista y escritor científico. Estoy especialmente agradecido a Hubert Lamb, que ha sufrido a menudo mis ingenuos interrogatorios y me ha animado a profundizar en esos misterios, y a sus colegas de la Unidad de Investigación Climática de la University of East Anglia, sobre todo a Tom Wigley, director de esa Unidad, y a Mick Kelly, que han aportado el germen inicial de muchas de las ideas aquí expresadas. Entre los otros especialistas a los que he acudido varias veces en demanda de información, merecen especial mención André Berger, Will Kellogg, Joe King, Kirill Kondratyev, George Kukla, Stephen Schneider y Goesta Wollin. Sin embargo, nunca me habría decidido a escribir un libro sobre el efecto invernadero si no hubiera sido por Jon Tinker, de Earthscan, que me pidió que preparara un documento de información sobre el tema, y su colega Kath Adams, que se aseguró de que el documento se publicara y de que tuviera lugar efectivamente la reunión de Estocolmo para la cual había sido escrito. Después de aquella reunión, los comentarios de Bert Bolin sobre el documento original me impulsaron a corregir algunos errores y me ayudaron a convencerme de que sabía ya lo suficiente acerca de este complejo problema como para publicar mi propia versión de una forma más permanente. Sin embargo, ésta no pretende, ni mucho menos, ser

la última palabra sobre el asunto, pues soy consciente de cuántas ideas acerca del tema han cambiado incluso durante el año en que he estado trabajando en el libro. La importancia del efecto invernadero justifica plenamente la elaboración de un informe accesible a las personas sin formación científica que tal vez estén desorientadas por algunas declaraciones y contra-declaraciones hechas sobre la perspectiva de un inmediato calentamiento global de la Tierra. Deseo que el presente libro capacite al lector para separar el grano de la paja en los comentarios que les lleguen acerca de dicho tema y le ayude a decidir por sí mismo dónde radica el meollo de la cuestión.

Desde que se escribió este libro ha proseguido la investigación de los cambios climáticos, y la máquina atmosférica nos ha echado encima otro duro invierno. La obra pretende ser un informe provisional sobre el presente estado de la cuestión, y no un trabajo definitivo sobre el efecto invernadero, pero hay al menos un nuevo estudio que debe ser mencionado. Ronald Gilliland, que trabaja en el High Altitude Observatory de Boulder, Colorado, publicó en 1981 varios artículos científicos en los que se establecía más allá de toda duda razonable que el propio Sol varía ligeramente de tamaño a lo largo de décadas. Además de «inspirar y espirar» —con poca intensidad— a intervalos regulares de 11 y 76 años, el diámetro del Sol se ha contraído de forma constante durante los últimos 250 años, según parece, como parte de un ciclo a más largo plazo. Gilliland relaciona esas variaciones con cambios climáticos en la Tierra en los pasados 250 años, sugiriendo que, cuando el Sol es más grande, la Tierra se enfría.

Estas ideas guardan una estrecha relación con el efecto invernadero y especialmente con el trabajo de Sherwood Idso mencionado en el capítulo 9. Al igual que otros investigadores que se citan en este libro, Gilliland ha tratado de simular la configuración de las recientes fluctuaciones de temperatura mediante el empleo de programas informáticos en los cuales se incluyen los supuestos efectos del polvo volcánico, del dióxido de carbono y de la recién descubierta variación solar. Sus mejores resultados se han conseguido a partir de una combinación de los tres factores, pero con un efecto inverna-

dero debido al dióxido de carbono mucho más parecido al que se deduce de los cálculos de Idso que al obtenido por otros climatólogos.

Esto simplemente pone de manifiesto la continua aparición de nuevos e intrigantes descubrimientos en la investigación de las causas del cambio climático. Espero que este libro sirva de ayuda al lector para comprender y apreciar la saga del tiempo atmosférico en el futuro a medida que se presente ante sus ojos.

JOHN GRIBBIN

INTRODUCCIÓN

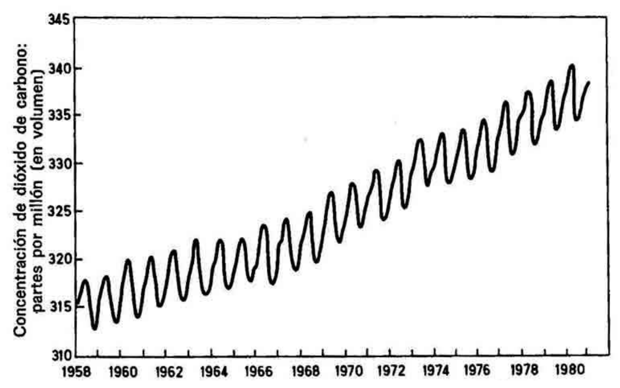
Vivimos en tiempos interesantes, y el misterio del cambio climático proporciona una de las más emocionantes incógnitas científicas de nuestra época. La preocupación acerca de la vulnerabilidad de un mundo, al parecer superpoblado, ante los caprichosos efectos del clima sobre las cosechas y la provisión de alimentos aumentó en los años setenta, con la llegada de inundaciones y sequías, rigurosos inviernos y abrasadores veranos en Europa, América del Norte y del Sur, la URSS, África, India y China. La impresión de muchas personas después de leer los periódicos y ver la televisión es que algo le ocurre al tiempo y que se trata de sucesos anómalos; dotado de una perspectiva más amplia, el especialista nos dice que eran los buenos años de mediados del siglo XX —las décadas de la «revolución verde»—, los que eran anormales, y que el tipo de variabilidad que experimentamos en la década de 1970 era más normal. En cualquier caso, a medida que la población sigue aumentando y los pueblos del Tercer Mundo luchan por ponerse al nivel del mundo desarrollado, la perspectiva de extremas y continuas fluctuaciones del tiempo preocupa cada vez más. Existe, pues, una creciente necesidad de información fiable sobre las futuras tendencias del clima, información que sirviera de base a la adopción de las medidas pertinentes por parte de los agricultores, los gobiernos y las instituciones de ayuda a otros países.

Tras varias décadas en las que el estudio del clima ha sido el pariente pobre de la meteorología, concentrándose en la predicción del tiempo para unos cuantos días, y no para decenios o años, la combinación de una creciente conciencia del problema y de la aparición de nuevas técnicas para hurgar en los misterios del clima en el pasado ha empezado a proporcionar una explicación coherente y sólida de cómo y por qué tienen lugar los cambios climáticos.

Existe la posibilidad de utilizar el archivo climático, constituido por firmes pruebas físicas, para arrojar nueva luz sobre cambios históricos que van desde la subida y bajada de los precios de los alimentos y el mercado de valores hasta el desarrollo y caída de las civilizaciones. El siguiente paso sería emplear los crecientes conocimientos de las variaciones climáticas naturales para predecir su tendencia en el futuro. De forma irónica, sin embargo, precisamente en el momento en que la humanidad se ha dado cuenta de la necesidad de tal predicción, y justo cuando hemos empezado a comprender los cambios climáticos naturales, nuestras propias actividades han introducido un nuevo factor en la cuestión. Al quemar combustibles fósiles (petróleo y, especialmente, carbón), por ejemplo, en la deforestación de los bosques tropicales, el hombre provoca un rápido incremento de la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera. Éste sin duda actúa como una manta alrededor de la Tierra, aprisionando el calor que de otro modo escaparía por radiación hacia el espacio y, por tanto, produciendo un calentamiento en la superficie de la Tierra. Muchos climatólogos creen que este «efecto invernadero» podría ser tan eficaz que, antes de finales del siglo XX, el aumento de temperatura causado por las actividades humanas empezaría a dominar sobre las naturales fluctuaciones del clima, trayendo consigo condiciones únicas en la larga historia de la civilización. El punto de vista de una minoría es que, aunque el efecto invernadero es real, tal vez sea mucho más débil y fácil de manejar. No obstante, incluso un calentamiento debido al efecto invernadero sería capaz de alterar la distribución de temperaturas y precipitaciones sobre grandes regiones del globo, desbaratando las normas establecidas de la agricultura.

En el pasado, los cambios climáticos afectaban a sociedades consideradas más primitivas que la nuestra. ¿Es el riesgo ahora mayor o menor que el que ellas afrontaban? En cierto sentido, parece que nuestra sociedad sea más capaz de arreglárselas frente a un cambio climático, ya que tenemos mejores casas, vestidos adecuados, aire acondicionado, energía fácilmente disponible y una tecnología avanzada. Sin embar-

go, en un sentido más fundamental —aún dejando aparte la cuestión de cuánto tiempo podremos contar con energía barata— estamos en una situación mucho peor que nuestros antepasados. Hace cien años, una tribu nómada en la región africana del Sahel se podía desplazar hacia el sur si lo hacían las lluvias. Hoy día, los descendientes de aquellos pueblos están confinados por barreras políticas a un país al borde del desierto. No se pueden trasladar hacia el sur porque esas tierras están ya habitadas; el crecimiento de la población implica una menor flexibilidad frente a los cambios climáticos.



El aumento de la concentración del dióxido de carbono atmosférico registrado por los instrumentos de control en Mauna Loa, Hawái. Aparte de la fluctuación estacional regular, hay un claro aumento desde el nivel inicial de 315 partes por millón en 1958 hasta 338 partes por millón en la actualidad. En 1959, el aumento fue de 0,66 ppm; en 1981, alcanzó 1,81 ppm en un solo año.

Antes de la segunda mitad de este siglo, existía siempre un exceso de tierra fértil disponible y había espacio para que los pueblos pudieran emigrar de regiones atacadas por la sequía, el frío u otros extremos climáticos. Hoy la situación ha cambiado. La emigración no es ya una respuesta viable al hambre; en lugar de ello, trasladamos los alimentos alrededor del mundo, desde las regiones más productivas a los países más necesitados, ya sea mediante el funcionamiento del «mercado» mundial de alimentos o en forma de ayuda alimentaria.

Este es el escenario en el que aparecen nuestros «tiempos interesantes» en relación con los estudios climáticos. Es evidente la urgencia de predicciones fidedignas, y disponemos ya de los conocimientos precisos acerca de los procesos naturales. Pero la irónica incertidumbre en los pronósticos surge a causa de los efectos indirectos de la principal razón —el crecimiento de la población— de la necesidad de la predicción climática.

En este libro trato de abordar dicho problema explicando en primer lugar la influencia que los cambios climáticos han tenido en el pasado, las causas naturales del cambio climático y la dirección que probablemente seguiría el clima en el futuro inmediato si se le dejara actuar por sí mismo. A partir de esta base podemos entonces enfrentarnos a las grandes incertidumbres del debate sobre el efecto invernadero y examinar las pruebas existentes sobre si el carro climático está a punto de volcar a causa de las actividades humanas. No hay ninguna seguridad en todo esto: el climatólogo Stephen Schneider suele decir bromeando que «lo único seguro en la vida es la muerte y los impuestos». No obstante, sí hay claras evidencias acerca de las medidas que habría que tomar como prevención contra el desastre; el tipo de incógnitas que se han de resolver puede ser ilustrado por la rapidez con que miembros de la poderosa camarilla pro-nuclear se han vuelto «ecologistas», expresando su preocupación sobre el daño que causa en el medio ambiente el dióxido de carbono producido por las centrales térmicas de carbón. La cuestión no afecta sólo a determinadas regiones del planeta, o únicamente a los países desarrollados; la idea de que el Tercer Mundo podría en realidad *beneficiarse* de un aumento del dióxido de carbono atmosférico, mientras las naciones más poderosas sufrirían, introduce una nueva dimensión en la política global y hace esencial el conocimiento de al menos un bosquejo del efecto invernadero debido al dióxido de carbono para cualquiera que se preocupe del futuro de la humanidad. Deseo que este libro proporcione tal información.

JOHN GRIBBIN

PRIMERA PARTE

EL CLIMA CAMBIANTE

I. TIEMPOS INTERESANTES

La década de 1970 trajo consigo una serie de condiciones meteorológicas «poco corrientes» en todo el mundo. La sequía dominó la región africana del Sahel de 1968 a 1972, y de nuevo a partir de 1975 en adelante, después de sólo uno o dos años de lluvia «normal». La falta repetida de monzones causó problemas en la India, con el peor desastre en 1974; fuertes heladas destruyeron la cosecha de café en dos estados brasileños en julio de 1975, de modo que los precios subieron bruscamente en el mercado mundial. En Europa, las sequías de los años 1975 y 1976 fueron acompañadas de lluvias copiosas y fuera de estación en el cinturón soviético del grano, y seguidas de tiempo invernal muy duro a finales de la década de 1970. Y en Estados Unidos, la historia de la segunda mitad de los años setenta fue la de una sucesión de inviernos muy fríos (dos de ellos, los «peores en cien años» sucesivamente: en 1976-1977 y en 1977-1978) y rigurosas sequías, que afectaron primero una región y después otra. Es natural preguntarse si «algo va mal» en relación con el tiempo, y la pregunta ha sido planteada repetidas veces en los titulares de los periódicos y en emisiones especiales de televisión.

También es cierto que esas extremas fluctuaciones del tiempo siguieron a una serie de décadas en las que nuestro clima fue relativamente estable y se «comportó bien». Aquéllos fueron los años de la revolución verde, cuando parecía que la tecnología humana había dominado el medio ambiente y que la agricultura no estaba ya a merced del tiempo y el viento. Sin embargo, el retorno de clima menos uniforme en la década de 1970 puso de manifiesto la falacia de esa complaciente creencia y demostró que la humanidad era, en muchos aspectos, más vulnerable que nunca a los caprichos de las variaciones naturales en el equilibrio climático.

En un discurso programático ante la Conferencia Mundial del Clima, convocada en 1979 por la Organización Meteorológica Mundial a raíz de la creciente preocupación acerca de los cambios climáticos. Robert M. White, de la National Academy of Sciences de Estados Unidos, insistió en que los recientes sucesos climáticos no son insólitos cuando se ven en la perspectiva correcta. «A lo largo de la historia han ocurrido con frecuencia fenómenos similares», dijo. «Lo nuevo es damos cuenta de que la vulnerabilidad de la sociedad humana ante los sucesos climáticos no ha desaparecido con el desarrollo tecnológico». La cuestión es que, en una época de población todavía en rápido crecimiento y de inadecuadas reservas de alimentos, somos vulnerables como nunca antes lo fuimos; y no tanto a las variaciones lentas y a largo plazo de las características climáticas, sino a las fluctuaciones erráticas e imprevisibles, que constituyen marcadas desviaciones respecto a los valores medios a largo plazo y que se dan de un año a otro, afectando diferentes regiones del globo de distintas formas. Por consiguiente, es sensato observar con un poco más de detalle esos sucesos del pasado reciente que han traído consigo una nueva conciencia de la continuada vulnerabilidad del hombre ante los fenómenos climáticos; después de ello, pasaremos a examinar la perspectiva histórica a más largo plazo y las razones de las fluctuaciones climáticas como esas que todavía constituyen un riesgo para tantos millones de personas. En cualquier estudio de ese tipo concerniente a los años setenta, la sucesión de sequías en la región africana del Sahel viene en primer lugar, no sólo cronológicamente, sino porque fue el primer episodio que nos hizo darnos cuenta del mensaje que tan sucintamente resumió Robert M. White en 1979.

El Sahel es la región de África que se halla justo al sur del desierto del Sahara; concretamente, se extiende a lo largo de seis estados africanos, todos ellos producto, en su forma moderna, de la desintegración del antiguo imperio colonial francés en África septentrional. Los estados del Sahel propiamente dicho son Mauritania, Senegal, Malí, Alto Volta, Niger (no se confunda con Nigeria, más al sur) y Chad; pero la región

afectada por la sequía se extiende mucho más al este a través de Sudán y Etiopía, constituyendo una banda que atraviesa África aproximadamente en el cinturón de latitud comprendido entre los 10° y los 20° al norte del ecuador (figura 1-1). Cuando son los climatólogos y no los políticos quienes se refieren al Sahel, suelen incluir la totalidad de la región propicia a la seguía, ocho empobrecidos estados africanos. Las sequías en esta región de África mataron en la década de 1970 más personas que todas las guerras menores y la actividad guerrillera que ahora tiende a acaparar la atención de las informaciones sobre esta zona; pero a principios de los años setenta fue la sequía la que se apoderó de los titulares.

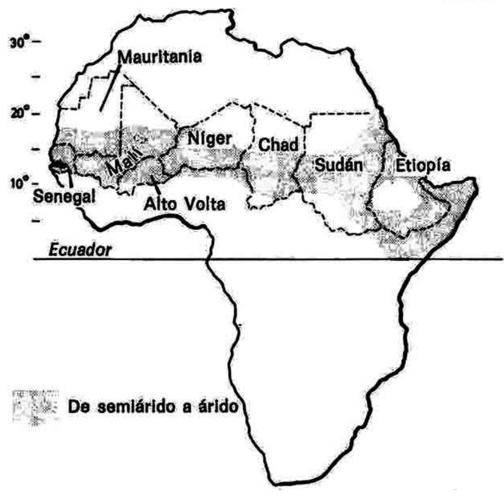


Fig. 1-1. La región africana propicia a la sequía se extiende desde el Sahel propiamente dicho, al sur del desierto de Sahara, hasta Etiopia en el este.

Cuando el clima de la región empeoró a finales de los años sesenta, cayó como un inesperado mazazo tras una década más o menos, de mejores condiciones de vida, lo cual parecía un tributo al dominio por parte del hombre de un medio ambiente hostil. La mayor parte de los pueblos del Sahel son nómadas que vagan por la región semiárida al sur del desierto, a fin de encontrar agua y pastos para sus anima-

les, de modo que la división de los imperios coloniales en estados modernos con rígidas fronteras políticas resultó inevitablemente algo arbitraria y, al romper con las formas tradicionales de vida, contuvo siempre las semillas del conflicto. Eso no pareció importante a principios y a mediados de la década de 1960, cuando la ayuda extranjera aportó a la región modernos métodos sanitarios, reduciendo la tasa de mortalidad y aumentando la población humana, al mismo tiempo que financió la perforación de profundos pozos que permitían el suministro de agua a los siempre crecientes rebaños de ganado. Para los nómadas, el ganado representa tanto riqueza como alimento; los ganados crecieron y se concentraron alrededor de los pozos, alimentándose con pastos mantenidos por los proyectos de irrigación y por una sucesión de seis buenos años de lluvia. Pero en 1968 cambió el panorama. Las lluvias, que habían parecido tan seguras, dejaron de extenderse hacia el norte, en los límites del desierto. La sequía no era nada nuevo en la región; simplemente un eco de sequías que se han repetido a lo largo de los siglos y que volvieron de nuevo a principios de éste. Sin embargo, nunca antes había tenido el Sahel una población tan grande, de personas y de ganado: los rebaños se comieron primero toda la hierba y después se dedicaron a otras plantas: las vacas arrancaban las hojas de los árboles y las cabras desenterraban las raíces. El resultado de ello fue un verdadero desastre ecológico, pues en 1969 apenas llovió, y la sequía se repitió en 1970 y durante los años siguientes. En 1975 las lluvias casi retornaron: la precipitación alcanzó el 90% de la cifra que había parecido normal a mediados de la década de 1960; pero pronto se vio que esa lluvia representaba entonces un máximo insólito, y no las condiciones «normales». En efecto, la cifra descendió al 30% del valor de los años sesenta en 1976 y años posteriores.

Los efectos del desastre se exacerbaron como consecuencia de los problemas políticos que las potencias coloniales habían dejado tras ellas. Niger, por ejemplo, es un estado que dobla el tamaño de Texas con una población de más de cuatro millones de habitantes. En el norte del país predominan las tribus nómadas de los tuareg, mientras que en el sur, donde la

lluvia es más regular, los principales centros de población están ocupados por los songhai. Cuando se estableció la sequía y las lluvias se desplazaron hacia el sur, los tuareg, siguiendo su costumbre ancestral, se trasladaron también hacia el sur. Apiñados en campamentos de refugiados cerca de las ciudades, sufrieron hambre y epidemias, y en 1973 Niger sólo tenía 82 médicos diplomados. Los habitantes de las ciudades, en lugar de proporcionar ayuda a los refugiados, más bien se inhibían, y en algunos casos los conflictos tribales desencadenaron tensiones raciales. Problemas similares surgieron entre los distintos estados del Sahel, donde los gobiernos se veían a sí mismos compitiendo con otros países pobres por alimentos y ayuda procedente del «rico Norte». Más de 100.000 personas murieron en el Sahel a raíz de la sequía, mientras que en las regiones del este, hacia Sudán y Etiopía, tal vez muriera aún más gente, si bien la reticencia de los gobiernos a admitir sus dificultades hace imposible obtener cifras fidedignas. El antiguo régimen etíope fue derrocado en parte como consecuencia de los problemas creados por la sequía. Los muertos y heridos resultantes de aquella guerra civil podrían también ser cargados en la cuenta de los cambios climáticos.

EL MONZÓN QUE NO LLEGA

¿Por qué se desplazaron las lluvias hacia el sur? Las lluvias de las que depende el Sahel son lluvias monzónicas. Llegan solamente en cierto período del año —en verano— y, a menos que haya variaciones climáticas, se puede contar con que vengan hacia la misma época cada año. En términos simples, las lluvias monzónicas son traídas por un viento del oeste procedente del mar que transporta aire húmedo sobre las tierras situadas al este. Cuando el aire húmedo asciende sobre la tierra se enfría y arroja su carga dé humedad en forma de lluvia. Estos vientos son parte de la circulación general de la atmósfera, régimen producido por la interacción del efecto de la rotación terrestre, del calentamiento solar —que en último término hace que el aire tropical caliente ascienda y se vaya

alejando del ecuador, mientras que aire más frío viene a reemplazarlo desde altas latitudes— y del equilibrio de tierras y mares. De una estación a otra y de año en año, los océanos se ven menos afectados que los continentes por las variaciones en la cantidad de calor solar que llega a ellos; se dice que tienen una mayor inercia térmica. En comparación con la tierra firme, el mar se mantiene caliente en invierno v fresco en verano: ésta es la razón de que los climas marítimos, como el de Oregon o el de las islas Británicas, muestren cambios estacionales menos extremos que los climas continentales, como el de Illinois o Siberia. Debido a la manera en que interaccionan todos esos componentes de la máquina atmosférica, y especialmente porque hay mucha más tierra firme en el hemisferio norte que en el sur, el límite entre las mitades norte y sur de la circulación atmosférica no coincide exactamente con el ecuador geográfico En el verano del hemisferio norte, el ecuador climático —conocido como zona de convergencia intertropical (ZCI)— se halla al norte del ecuador, mientras que durante el invierno septentrional está al sur del ecuador. El monzón estival del oeste, tan importante para el Sahel así como para la India y Asia, es una característica de la circulación atmosférica al sur de la ZCI y al norte del ecuador: se halla en el hemisferio sur en términos climáticos, pero geográficamente está en el hemisferio norte. Esto es precisamente una peculiaridad geográfica de nuestro planeta; lo importante para el Sahel es que cuando la ZCI queda un poco más hacia el sur en verano, mantiene las lluvias monzónicas en las proximidades del ecuador, impidiéndoles alcanzar la región semiárida del borde meridional del desierto del Sahara.

Así, la cuestión es por qué ahora la ZCI no se mueve tan hacia el norte en verano como lo hacía a principios y mediados de la década de 1960. Examinaremos el funcionamiento de la máquina térmica atmosférica y de ¡a circulación de la atmósfera en el capítulo 3, pero, de forma simple, se puede pensar en una configuración de bandas concéntricas, cada una con su régimen característico de clima y vientos, centrada en el polo de cada hemisferio y extendiéndose hacia el ecuador o. más exactamente, hasta la ZCI En cada hemisferio, la re-

gión sobre el propio polo es una zona de relativa calma, rodeada de un cinturón de vientos dominantes del oeste que circundan el globo a gran altura, el llamado vórtice circumpolar. Esta corriente general del oeste es el factor principal de la circulación atmosférica, y las variaciones de su comportamiento afectan las zonas climáticas de la totalidad del hemisferio. Existe a consecuencia de las diferencias de calentamiento de diferentes zonas de latitud por parte del Sol, y sólo es ligeramente influida por la distribución geográfica de tierras y mares. Ha sido, por tanto, una característica de la Tierra durante la mayor parte de sus 4.500 millones de años de historia. Sin embargo, esas pequeñas influencias de la geografía, incluyendo las variaciones en la cobertura de hielo de las altas latitudes, y otros efectos de los cuales se trata en el resto de la primera parte de este libro, pueden ser de importancia crucial para la humanidad si, por ejemplo, trasladan el cinturón monzónico en África algunas decenas de kilómetros hacia el sur, o producen sequía en las Grandes Llanuras (Great Plains) de Norteamérica. Sin entrar todavía en la causa de que el vórtice circumpolar pueda cambiar sutilmente de posición de un decenio al siguiente, está claro que, si el vórtice se dilata desde el polo, ciertas zonas climáticas, incluyendo el cinturón monzónico, quedan comprimidas hacia el ecuador. Derek Winstanley, climatólogo establecido en Canadá, y Reid Bryson, profesor de Meteorología y Climatología de la University of Wisconsin –Madison—, se encuentran entre los especialistas que han explicado la desaparición de las lluvias del Sahel como un efecto secundario de tal dilatación del vórtice circumpolar del hemisferio norte. De ello se deduce que el problema no es algo baladí, limitado a algunos países empobrecidos de una zona del mundo económicamente poco importante, sino parte de una tendencia mayor que afecta al menos a la totalidad del hemisferio norte. Y Bryson. Winstanley y otros que suscriben este punto de vista no tienen dificultad en encajar los otros desastres climáticos del hemisferio norte en los años setenta dentro de este planteamiento.

LOS ANTICICLONES DE BLOQUEO

El gran río de aire denominado vórtice circumpolar sigue un camino que describe meandros alrededor del globo. No corre exactamente de este a oeste, sino que efectúa ligeras ondulaciones en sus viajes, moviéndose desde el norte un poco más hacia el sur y de nuevo hacia el norte. A gran altura sobre el suelo, el viento sopla con tal fuerza que se le ha llamado corriente en chorro, y las rutas de vuelo de los modernos aviones que cruzan el Atlántico o el Pacífico se ajustan en los viajes de oeste a este para aprovechar el viento de cola, mientras que en los vuelos de este a oeste se eligen para evitar el viento de cara. Dejando por el momento los trópicos y las regiones monzónicas y trasladando la historia climática hasta las latitudes de la corriente en chorro, entramos en las latitudes templadas de los países ricos y desarrollados de Norteamérica y Europa. La corriente en chorro no sopla al nivel del suelo (o del mar), pero ejerce una influencia directa en la superficie de la Tierra en la forma de los sistemas meteorológicos llamados depresiones, sistemas de baja presión que se mueven de oeste a este siguiendo, en líneas generales, la configuración de la corriente en chorro de la parte alta de la troposfera y baja estratosfera. Donde la corriente en chorro se desvía hacia el sur, las depresiones hacen lo mismo: donde aquélla se desvía hacia el norte, éstas vuelven a imitarla. Las depresiones aportan precipitación —lluvia o nieve— y los meandros de la corriente en chorro pueden llevar aire caliente a latitudes más altas o aire polar helado a lugares más hacia el sur.

Cuando el vórtice circumpolar es intenso y la corriente en chorro sopla con fuerza, ésta sigue aproximadamente un paralelo alrededor de las regiones polares, con pocos meandros. Las zonas climáticas al sur tienen amplio espacio para extenderse hacia el norte, los monzones llegan con bienvenida regularidad, y las regiones templadas gozan de años suaves sin grandes extremos de temperatura o de lluvia. Sin embargo, cuando el vórtice circumpolar es débil, la corriente principal de vientos del oeste fluye perezosamente y zigzaguea más.

El dominio de influencia del vórtice circumpolar empuja más hacia el sur, comprimiendo zonas climáticas hacia el ecuador y limitando la penetración del monzón hacia el norte (fig. 1-2).

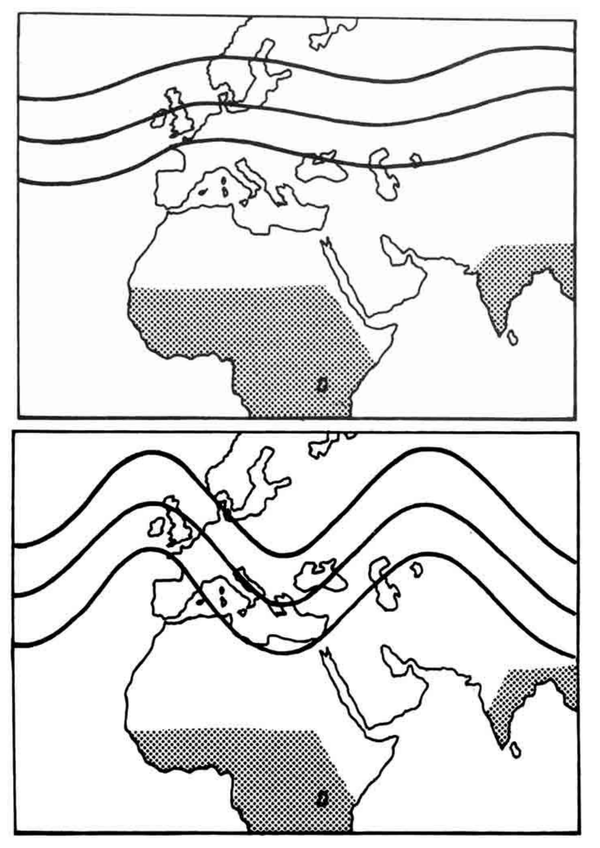
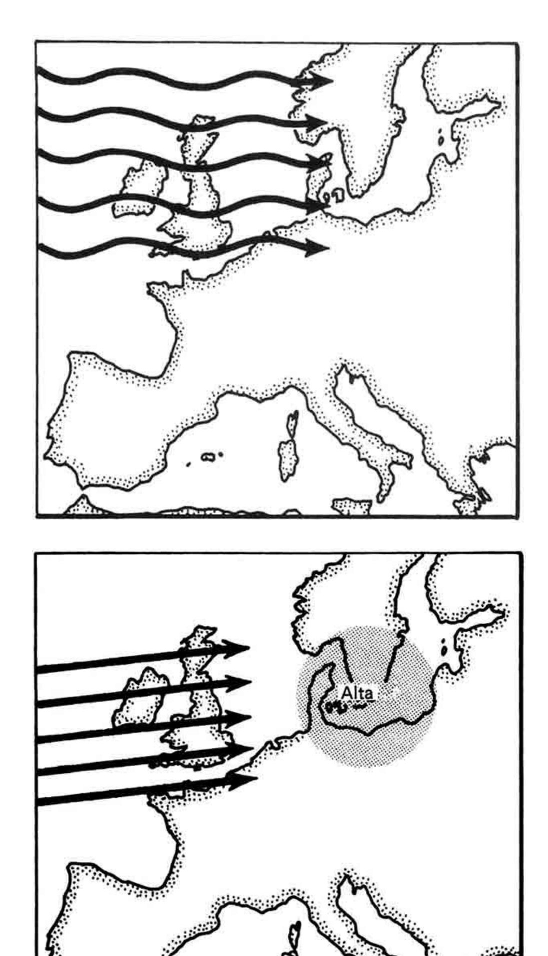


Fig. 1-2. Las variaciones de la circulación atmosférica en el hemisferio norte afectan directamente a las lluvias monzónicas del Sahel. La circulación zonal intensa de oeste a este permite que las lluvias monzónicas se extiendan hacia el norte; cuando la circulación zonal es débil y se desvía fácilmente, las lluvias son empujadas hacia el sur. La zona punteada indica de forma esquemática la extensión del monzón en cada caso.

Al mismo tiempo, en la zona templada que incluye Norteamérica y Europa, la corriente en chorro, ahora más lenta, y sus depresiones acompañantes en la superficie pueden ser desviadas con mayor facilidad por otros factores de la circulación general atmosférica. Las regiones donde la presión atmosférica es alta —anticiclones o. simplemente, «altas»— actúan como colinas o islas de estabilidad en la atmósfera, alrededor de las cuales fluyen las depresiones («bajas») y la corriente en chorro. A diferencia de las montañas reales, por supuesto, las altas atmosféricas son características temporales, y también se mueven de oeste a este en esas latitudes; pero cualquiera puede intentar predecir el tiempo para 24 horas suponiendo que los sistemas de alta presión que se ven en el mapa del tiempo derivarán ligeramente hacia el este llevando con ellos tiempo bueno y seco, mientras las bajas correrán a lo largo de sus flancos transportando consigo lluvia o nieve. En ocasiones, sin embargo, por razones no del todo conocidas, un sistema de alta presión queda clavado en un lugar. Tal anticiclón de bloqueo puede permanecer allí días o incluso semanas, actuando como una montaña real alrededor de la cual han de moverse los otros sistemas meteorológicos. Dado que los anticiclones son regiones de aire despejado y en calma, las zonas geográficas que se hallan debajo de ellos experimentan tiempo bueno y seco en verano y tiempo seco y frío con intensas heladas nocturnas en invierno. Un alta estival que permanece demasiado tiempo en un lugar se convierte rápidamente en un problema, ya que una sucesión de días buenos y secos puede anunciar pronto una sequía (fig. 1-3).

Todos los indicios sugieren que las desgracias y tribulaciones climáticas de las décadas de 1970 y 1980 —los «tiempos interesantes» en que vivimos— pueden relacionarse directamente con una dilatación y debilitamiento del vórtice circumpolar, que no sólo ha empujado el monzón hacia el sur, sino que ha permitido que los anticiclones de bloqueo retornen con una frecuencia no deseada, guiando a los sistemas de baja presión con sus cargas de humedad a lo largo de extremos meandros al norte o al sur de sus trayectorias principales oeste-este alrededor del globo.


Alta

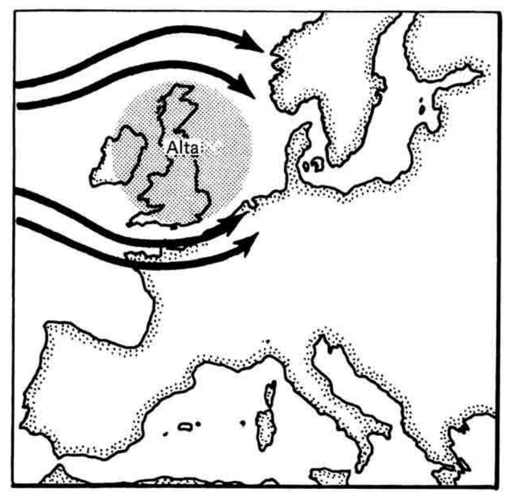


Fig. 1-3. La circulación débil también crea problemas más hacia el norte. Con circulación intensa, las depresiones portadoras de lluvia se desplazan generalmente a través de Gran Bretaña y penetran en el continente europeo. Con circulación débil, en cambio, puede establecerse un «anticiclón de bloqueo», que desvía las corrientes de aire portadoras de lluvia, produciendo sequía, como ocurrió en Gran Bretaña en el verano de 1976, o que detiene las depresiones sobre estas islas, con lo que tienen lugar copiosas precipitaciones e inundaciones.

En 1972 se produjeron en todo el mundo una serie de desastres agrícolas relacionados con el tiempo, los cuales constituyeron un ejemplo clásico de las «teleconexiones» atmosféricas que hacen los cambios climáticos importantes para todos nosotros, no sólo para los nómadas del cinturón monzónico. En la India, el malogro del monzón en 1972 provocó un descenso del 8% en la producción de arroz; en aguas del Perú, la pesca de las anchoas, que había constituido la base de la economía de la región, fue sumamente escasa, y las sequías en Australia y Sudamérica pusieron de manifiesto que estamos sufriendo un fenómeno de alcance global, no confinado al hemisferio norte; se intensificó la sequía en el Sahel, y la producción soviética de alimentos bajó en un 8%, experimentando la región alrededor de Moscú la peor sequía de los últimos 300 años. Con inundaciones en el Medio Oeste de

Estados Unidos, éste fue el peor año de nuestra época para la agricultura, considerada globalmente, y la producción total de alimentos en el mundo se redujo en un 2%, el primer descenso desde la Segunda Guerra Mundial. Nada podría demostrar más claramente el hecho de que, incluso con la moderna tecnología agrícola, no podemos hacer frente a los peores desastres que la naturaleza nos depare. Mientras que la Unión Soviética compensó su déficit de alimentos con la adquisición de 28 millones de toneladas de grano de Estados Unidos, el precio de la carne y el pan subió en los supermercados americanos, siguiendo la simple lógica de la oferta y la demanda, y la agricultura se convirtió en una cuestión política clave. Todo esto, sin embargo, era sólo el preludio de lo que iba a venir después.

MÁS TIEMPO ANÓMALO

Le tocaba ahora a Europa experimentar la siguiente temporada realmente espectacular del llamado tiempo «anómalo» (el adjetivo tal vez no sea muy apropiado, como veremos más adelante; lo que los comentaristas quieren indicar es que el tiempo es poco corriente en comparación con las condiciones del pasado reciente. Pero ¿es poco corriente comparado con un pasado histórico más amplio o con lo que podemos esperar en el futuro?). Aunque el invierno de 1974-75 fue moderado en Inglaterra, en junio de 1975 se produjo una nevada en Londres, la primera que caía en esta época del año en el presente siglo. Después, como para confundir al público —y a los cultivos— el frio fuera de estación dio paso a los meses de julio y agosto más cálidos en muchos años. En conjunto, 1975 llegó a ser el quinto año más seco del siglo XX, debido en gran parte a las condiciones producidas por un anticiclón de bloqueo en Europa occidental, y como las lluvias dejaron de producirse durante el invierno, se empezó a usar el término sequía.

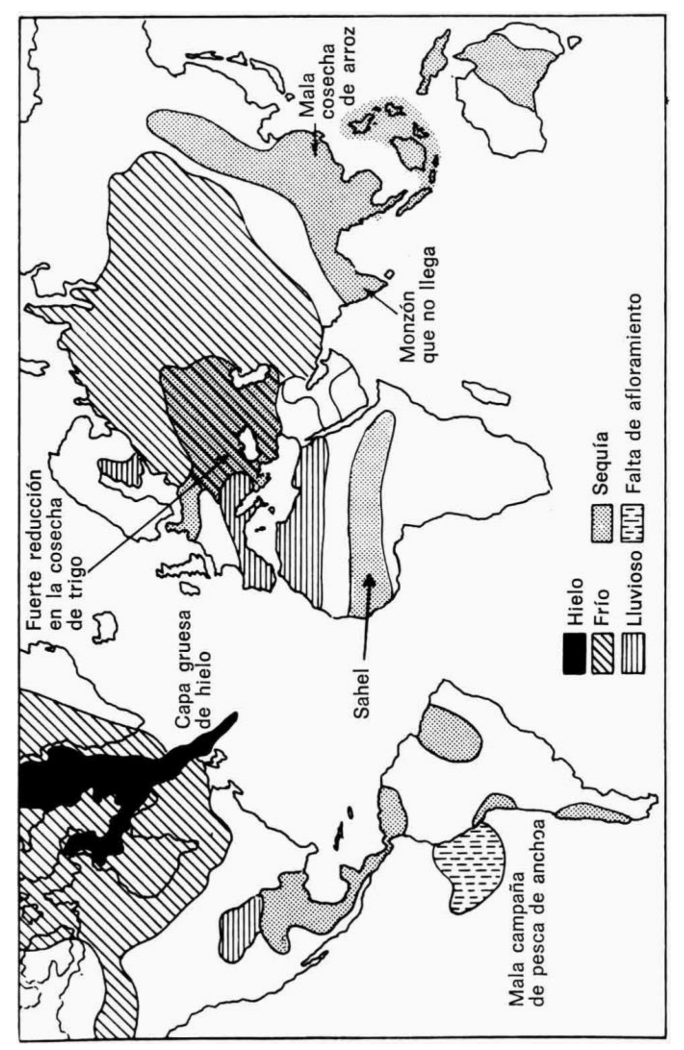


Fig. 1-4. 1972 fue un año de desusado mal tiempo en todo el mundo. Las sequías y las malas cosechas se muestran con detalle en el mapa. Algunos climatólogos relacionan estos sucesos con un enfriamiento global; pero es una ingenuidad suponer que, por consiguiente, un calentamiento global ha de ser «bueno».

Mientras tanto, más hacia el este, los rusos estaban de nuevo pasando una mala temporada con sus cosechas, y en el otoño de 1975, persistentes rumores procedentes de la URSS hacían sospechar una escasez de grano todavía peor que la de 1972. De mayo de 1975 a abril de 1976 fue el período de doce meses más seco registrado en Inglaterra y Gales, y lo último que nadie esperaba era que lo siguiera otro verano abrasador. Pese a ello. 1976 dejó en segundo término incluso a 1975. El anticiclón de bloqueo permaneció sobre Inglaterra una semana tras otra. Pasado el mes de junio más cálido del siglo y después de más de un año de sequía, el Támesis se secó completamente a lo largo de 15 km desde sus fuentes, y muchos embalses quedaron a una quinta parte de su capacidad. La cosecha francesa de grano se redujo en un 25%, mientras toda Europa occidental se tostaba al sol. La historia en el este era, de nuevo, distinta.

El anticiclón de bloqueo que se había situado sobre Europa mantenía secas Inglaterra. Francia y las regiones próximas, pero los sistemas de baja presión, siguiendo el curso ondulado de la corriente en chorro, tenían que ir todavía a algún sitio con su carga de humedad recogida a su paso sobre el Atlántico. La mayor parte de ellos escogieron el borde septentrional del anticiclón de bloqueo —la porción de la corriente en chorro desviada hacia el norte— y descendieron después sobre la región del Báltico alrededor de Moscú y Leningrado, descargando allí su lluvia. Escocia, Escandinavia y el Báltico se perdieron el abrasador verano; tanta lluvia resultó desastrosa para la cosecha soviética de grano como demasiado poca lo había sido para la francesa; y, una vez más, la influencia del tiempo sobre la agricultura desbarató los planes económicos a escala global.

Calculando el promedio de la lluvia caída sobre Europa y Rusia, de hecho, no resulta ni más ni menos que la normal; lo que sucedió es que en una región había sequía mientras que en otra se producían inundaciones. Y haciendo lo mismo para la totalidad del año 1976, se obtiene de nuevo una impresión engañosa, porque la gran sequía de 1975-76 finalizó en Inglaterra y Gales con lluvias torrenciales durante el otoño. El

periodo de 16 meses más seco en los archivos meteorológicos fue seguido por el segundo septiembre-octubre más lluvioso desde que existen datos. Con los embalses llenos, los perplejos agricultores vieron sus asolados y agostados campos transformarse en pantanos.

Mientras todo esto tenía lugar en Europa, las grandes llanuras de la parte septentrional del centro de Estados Unidos habían experimentado, del 10 al 12 de enero de 1975, uno de los peores temporales de nieve en la historia de la región. Las nevadas se extendieron hacia el norte hasta las regiones centrales de Canadá, y en Estados Unidos cubrieron Dakota del Norte y del Sur. Iowa. Nebraska y Minnesota, haciendo morir congeladas a más de 55.000 cabezas de ganado y matando a ocho personas a causa del frío o de ataques cardiacos mientras luchaban contra el temporal. A finales de 1976, mientras la sequía en Europa se desvanecía, era de nuevo Norteamérica la que aparecía en los titulares, con casi exactamente el mismo cuadro de persistentes extremos climáticos que habían estado afligiendo a Europa: sequía en el oeste y copiosas precipitaciones en el este. La causa era la misma, condiciones de bloqueo y una corriente en chorro ondulada. Sin embargo, el efecto fue diferente debido a las extremadas condiciones que se habían creado durante el invierno, llevando consigo no lluvia sino nieve al noreste, a medida que los sistemas de bajas presiones cruzaban Canadá y descargaban su agua. La sequía fue mucho más importante que el temporal en términos económicos, y encajaba exactamente en la sucesión de sequías que se han abatido sobre las grandes llanuras cada unos 20 años desde el comienzo del siglo XIX. No obstante, fueron las nieves del noreste las que causaron el mayor impacto en los medios de comunicación.

Durante el invierno de 1976-77, miles de trabajadores fueron despedidos en el noreste, docenas de personas murieron en la nieve, y la economía recibió un mazazo estimado en 6.000 millones de dólares, reduciendo el producto nacional bruto real de la totalidad de Estados Unidos en un 1%, según el economista jefe de la Cámara de Comercio. Jack Carlson. A mediados de febrero de 1977, el Servicio Meteorológico de

Estados Unidos declaró oficialmente que el invierno, en los dos tercios orientales del país, había sido el peor desde la fundación de la República, y mientras incluso Florida sufrió los efectos de una helada, causante de la destrucción de más del 10% de la cosecha de cítricos, la frase «el peor en cien años» empezó a aparecer regularmente para describir un extremo climático local después de otro. Mucha gente se consoló con esa frase, suponiendo que después del «peor invierno en cien años» transcurrirían otros cien antes que sucediese algo comparable. Su ingenuo optimismo quedó destrozado en enero de 1978, cuando otra sucesión de condiciones meteorológicas extremas se apoderó de Estados Unidos. Tras un año de sequía. California vivió cuatro semanas de lluvia y nevadas continuas, causantes de inundaciones. En Louisville. Kentucky, se registraron 40 cm de nieve: en Boston. Massachusetts, cayeron 53 cm de nieve en un temporal, en febrero de 1978, y, tres semanas más tarde, una segunda borrasca arrojó casi 70 cm de nieve en 24 horas, acompañada de vientos de 160 km por hora en lo que se describió como un «huracán de nieve». Los esquiadores aparecieron en masa, allí y en la ciudad de Nueva York, donde «sólo» cayeron 33 cm de nieve en un temporal el 20 de enero. ¿Cómo era posible que dos «inviernos peores en 100 años» se sucedieran tan rápidamente?

Hay dos respuestas a esa pregunta. La primera es que. así como el hecho de que salgan varias caras seguidas al lanzar una moneda perfectamente equilibrada no altera la probabilidad del 50% de que en el próximo lanzamiento vuelva a salir cara, tampoco el que haya un invierno (o sequía) de «uno en cien» altera la probabilidad de 100 a 1 de que el invierno próximo sea igualmente duro. Aun así, es muy mala suerte que dos de tales desastres vayan seguidos. La segunda respuesta, sin embargo, es más amenazadora. El que se produzca un invierno «peor en cien años» podría querer decir que es una anomalía de uno en cien; pero podría significar también que el tipo de inviernos que eran *corrientes* hace un siglo ha vuelto a presentarse como consecuencia de una variación climática natural. La explicación de los desastres relacionados

con el tiempo en la década de 1970 en términos de una circulación atmosférica debilitada, de un vórtice circumpolar dilatado y de una corriente en chorro ondulada encaja exactamente con los hechos y lleva consigo la sombría perspectiva de que tales condiciones meteorológicas «anómalas», permanezcan con nosotros durante años o decenios.

EN LA DÉCADA DE LOS OCHENTA

Dentro de este contexto, la Comunidad Económica Europea inició en 1978 un importante estudio del cambio climático y de los efectos que el tiempo anómalo tiene en nuestras vidas. Cuando se anunció la decisión a la prensa, los representantes de la CEE llamaron la atención sobre la sucesión de condiciones meteorológicas extremas que Europa había experimentado durante los últimos 15 años. Estas incluían el invierno más frío desde 1740, el más seco desde 1743, el más suave desde 1834, la mayor sequía desde 1726 y el mes de julio más cálido (en 1976) desde que se empezaron a registrar tales datos hace tres siglos. A lo largo del mismo período, como hemos visto, se han experimentado en todo el mundo similares condiciones, si bien no hay datos suficientes de los últimos 300 años que permitan establecer comparaciones en Norteamérica y en muchas otras partes del mundo. Después del anuncio de la CEE, las condiciones extremas continuaron con un verano casi inexistente en gran parte de Europa en 1978, seguido de un otoño extraordinariamente bueno y seco que batió todas las marcas. En enero de 1979. Gran Bretaña sufrió el peor invierno que se conoce, y la tendencia al tiempo anómalo parece que continúa en la década de 1980.

El 15 de enero de 1981, el *Times* de Londres publicaba en primera página un artículo titulado MUEREN CENTENARES AL ATENAZAR EL FRÍO TRES CONTINENTES, en el que informaba sobre las dificultades causadas por fuertes temporales de nieve en España y el suroeste de Francia, «más del acostumbrado cupo» de mal tiempo en Japón y un estado de emergencia declarado en Florida, tras dos días de helada que produjo

severos daños en las cosechas de cítricos, tomate y caña de azúcar Algunas semanas después, el 22 de marzo, el periódico hermano del *Times*. *The Sunday Times*, traía una información más detallada sobre los serios problemas planteados por la sequía y las inundaciones en diferentes partes de China. Precisamente hasta diciembre de 1980, la República Popular China se había enorgullecido de poder alimentar a sus 1.000 millones de habitantes. Sin embargo, tras una serie de desastres agrícolas provocados por el clima, el gobierno chino dio el paso sin precedentes de llamar a observadores de las Naciones Unidas para hacer balance de su situación, y pidió formalmente ayuda al Oeste capitalista para evitar el hambre. En cierto modo, esto refleja el hecho de que el presente régimen de China es más abierto que el de los años sesenta y setenta: pero, sobre todo, pone de manifiesto que esta clase de desastre agrícola no se había producido en China desde los días de la guerra civil.

En la provincia de Hubei, a unos 800 km al sur de Pekín, el principal problema fueron las inundaciones, que destruyeron escuelas, hospitales, centrales térmicas, puentes, carreteras y 210.000 hogares, causando daños estimados en términos económicos en 1.000 millones de dólares y la pérdida de dos millones y medio de toneladas de grano.

En la provincia de Hebei, alrededor de la propia Pekín, el problema fue la sequía. En 1980, la media mensual de lluvia de la provincia nunca superó el 80% de la «normal» y en muchos casos no llegó al 30%. Las pérdidas de grano sumaron en total cuatro millones y medio de toneladas, y el nivel de agua subterránea bajó tanto que se vio afectada la provisión de agua para beber, y los problemas que sufría la población quedaron después exacerbados por un durísimo invierno. Como decía *The Sunday Times*, el alcance del problema puede apreciarse en su justo valor teniendo en cuenta que Jingzhou, una de las prefecturas de la provincia de Hubei, es del tamaño de Holanda. Más de 43 millones de personas resultaron afectadas por los desastres de las provincias de Hubei y Hebei, y China informó que otros 130 millones de personas en otras cinco provincias sufrieron en menor grado dificulta-

des similares. Dado que China alberga un tercio de la población total del mundo en desarrollo, y las Naciones Unidas y otros organismos de ayuda están ya forzados al máximo en el intento de hacer frente a los problemas que afectan a los otros 2.000 millones de miembros del Tercer Mundo, la perspectiva de que China pudiera perder su carácter de nación autoabastecida es desoladora para cualquiera que se preocupe del futuro de nuestra sociedad global y del desequilibrio económico entre unos países y otros. El problema es que, en el momento en que China necesita ayuda del rico norte, éste tiene que enfrentarse a sus propios problemas, y puede ser menos capaz que antes de proporcionar ayuda, en especial de tipo alimenticio. Ello quedó demostrado de forma contundente cuando la sequía se repitió en Estados Unidos (a los que apenas había abandonado) a finales del verano de 1980.

A nadie sorprenderá ahora saber que la sequía fue causada por un anticiclón de bloqueo sobre la parte occidental de Estados Unidos, una «meseta» de alta presión en la atmósfera que desvió las depresiones portadoras de lluvia hacia el norte, a través de Canadá. La sequía en el oeste de Estados Unidos siguió a un verano seco y planteó problemas inmediatos; más hacia el este, sistemas de bloqueo impidieron que los vientos cargados de humedad procedentes del golfo de México alcanzaran el cinturón de grano, y después de las tribulaciones de los años setenta, el contenido de agua en el subsuelo alcanzó un mínimo «absoluto» (esto es. el valor más bajo desde que la gente empezó a preocuparse de tales medidas en esa parte del mundo, hace menos de cien años). La ironía final fue que los vientos que «deberían» haber soplado normalmente desde el Pacífico de oeste a este, descargando su humedad donde hacía falta y no interfiriendo con la corriente procedente del golfo de México hacia el cinturón de grano, tuvieron todavía fuerza suficiente para desviarse otra vez al norte en el otoño y el invierno de 1980-81, desplazando hacia el Atlántico la trayectoria de las depresiones, que en genera! circulan a lo largo de la costa oriental y aportan lluvia a Nueva Inglaterra. No una, sino tres sequías, en el oeste, en el cinturón de grano y en el noreste, se produjeron como resultado del complejo sistema

de bloqueo que afectó a la totalidad de Norteamérica (fig. 1-5). La ciencia meteorológica es todavía incapaz de explicar con precisión por qué debía ocurrir tal conjunto de sucesos en un año particular, ni puede predecir la formación de tal sistema de bloqueo Sin embargo, la climatología sí puede poner todos esos problemas en su adecuada perspectiva histórica. No sabemos exactamente en qué años se producirán sistemas de bloqueo; pero sí podemos ver que la mayor frecuencia de sequías y de otros extremos climáticos es de esperar a medida que el tiempo en el mundo, más que haber aportado condiciones «anómalas» en la década de 1970, está en realidad retornando a unas condiciones que dominaron el globo durante el pasado milenio.

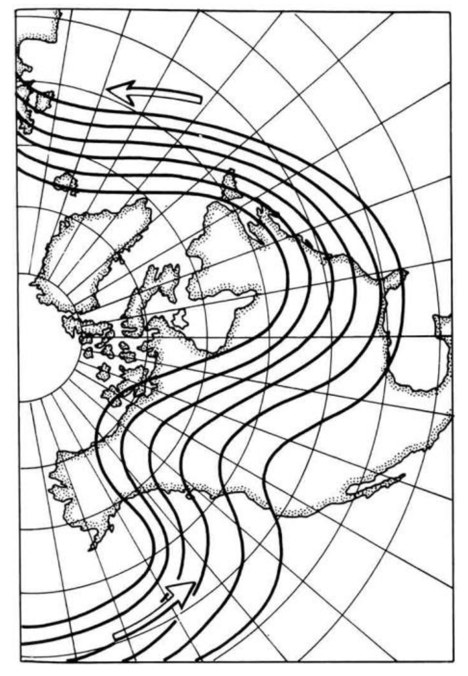


Fig. 1-5. Altas presiones bloqueantes alteran las condiciones climatológicas en Norteamérica. Un «bucle» persistente en el flujo de vientos del oeste, en el invierno de 1980-81, provocó una importante sequía.

II. LA PERSPECTIVA HISTÓRICA

El término «tiempo normal, carece de sentido sin una explicación del intervalo de tiempo a partir del cual se han determinado las condiciones normales. En la mayoría de las partes del mundo, el tiempo cambia de forma espectacular —aunque dentro de unos límites previsibles— en el curso de un solo año, con el ciclo «normal» de las estaciones. Sin embargo, no hay dos años exactamente iguales, y no hay dos décadas que sigan idéntica pauta de variaciones del tiempo. La definición más sencilla de clima es, de hecho, «tiempo medio»: pero el tiempo medio de la década de 1970, por ejemplo, fue muy diferente del de la década de 1670, mientras que hace sólo 20.000 años, un período muy corto en la historia de la Tierra, nuestro planeta se hallaba en plena glaciación. El clima siempre está cambiando cualquiera que sea el período de tiempo que se considere: no obstante, haberse dado cuenta de esto es en gran parte una característica de la ciencia moderna, pues, hasta bien entrado el siglo XX, los meteorólogos creían que las únicas variaciones en el tiempo eran fluctuaciones en torno del valor medio y que, hallando éste en un período de tiempo lo suficientemente largo, se podrían definir las condiciones meteorológicas normales, es decir, el clima, para cualquier punto de la superficie de la Tierra.

No es sorprendente que la variabilidad del clima sea un descubrimiento reciente de la ciencia, pues sólo a partir de 1840 se empezaron a registrar de forma oficial los datos de temperatura, lluvia, etc., en el Royal Greenwich Observatory, en Londres. Hacia la misma época, el osado y joven presidente de la Swiss Society of Natural Sciences. Louis Agassiz, apadrinó la entonces nueva teoría de que las grandes rocas arañadas y pulidas que se ha liaban dispersas por todas las montañas del Jura habían sido dejadas allí por una gran capa de hielo que se había fundido hacía miles de años. El debate

acerca de la realidad de una gran glaciación se mantuvo durante decenios, pero incluso cuando, a finales del siglo XIX, se aceptó el hecho de que la Tierra había experimentado más de un período glacial en el curso de su historia geológica, el mundo científico consideraba que se había tratado de sucesos catastróficos acontecidos en un remoto pasado. El hecho de que la Tierra pudiera sufrir un cambio climático lo bastante importante como para cubrir de hielo grandes zonas de Norteamérica y Europa no alteró la fe de los científicos en que el clima presente era básicamente invariable. Sólo poco a poco se fue minando esta creencia, a medida que los crecientes registros de observaciones meteorológicas empezaron a demostrar directamente que el tiempo de mediados del siglo XX era diferente del de hacía un siglo, y conforme el progreso de las técnicas geológicas, junto con los estudios históricos, proporcionaron un cuadro todavía más claro de un clima cambiante en tiempos históricos, especialmente en Europa.

Hoy día existe tal riqueza de información comparativa acerca de los climas del pasado que tiene más importancia que nunca especificar el período de interés particular. Considerando globalmente la historia de la Tierra (de unos 4.500 millones de años de antigüedad), el tiempo «normal» es mucho más suave que el actual, con regiones polares libres de hielo, e incluso la que tenemos por zona templada, cubierta de exuberante vegetación, «tropical». De vez en cuando, a causa de la constante y lenta deriva de los continentes alrededor del globo, tienen lugar unas condiciones geográficas que permiten la formación de grandes casquetes de hielo sobre los polos, y entonces la Tierra se ve inmersa en una época glacial que puede durar millones o decenas de millones de años. Dentro de la época glacial, los hielos se retiran y se extienden produciendo una sucesión rítmica de glaciaciones propiamente dichas, separadas por períodos interglaciales de corta duración, más cálidos que las glaciaciones, pero de ningún modo tentó como el estado normal de la Tierra a largo plazo. Vivimos ahora en uno de tales períodos interglaciales, una temporada relativamente cálida entre glaciaciones, que son en sí

mismas parte de una época glacial que ha atenazado la Tierra durante más de tres millones de años (fig. 2-1).

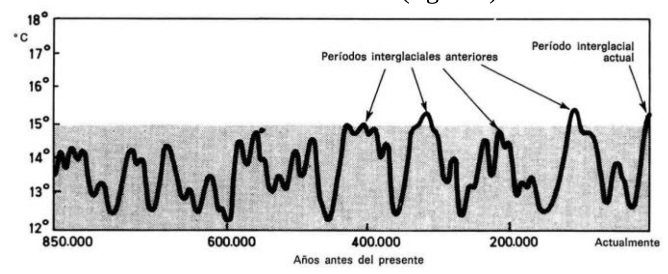


Fig. 2-1. Todo el periodo relativamente cálido durante el cual se ha desarrollado y ha florecido la civilización humana representa un periodo interglacial de corta duración: una desviación insólita con respecto a las condiciones mucho más frías que han prevalecido en la Tierra durante millones de años. Diversas técnicas geológicas ponen de manifiesto el grado de variación de la temperatura media global en esta figura, compilada por la National Academy of Sciences de Estados Unidos.

EL ACTUAL PERÍODO INTERGLACIAL

Así pues, aunque en una escala de tiempo de cientos o miles de millones de años, el clima normal fuese más cálido que el de hoy, considerando los dos últimos millones de años, el clima normal ha sido mucho más frío que el actual. Analizaremos con más detalle las causas de tales cambios y lo que nos pueden decir acerca de la inminencia de la próxima glaciación, el fin del presente período interglacial, en el capítulo 4. En cierto modo, tenían razón aquellos meteorólogos de la época victoriana que ignoraban deliberadamente la existencia de las glaciaciones cuando querían establecer el tiempo normal de la época; cambios tan espectaculares suceden ciertamente en una escala distinta de todo lo que ha ocurrido en tiempos históricos, y la mejor guía para investigar el tipo de cambios que podríamos esperar de decenio en decenio y de siglo en siglo no consiste en observar la sucesión rítmica de las glaciaciones, sino en estudiar la forma en que el tiempo ha ido variando durante el presente período interglacial, desde el final de la más reciente glaciación. Ésta tuvo lugar hace algo

más de 10.000 años, y no es una coincidencia que el desarrollo de la civilización humana en la Tierra se haya producido a lo largo de ese mismo período de tiempo de 10.000 años, iniciándose con la revolucionaria invención de la agricultura en los milenios en los que el hielo se estaba retirando, cuando la agricultura empezó a ser una posibilidad practicable alrededor del Mediterráneo. Diez mil años de historia climática es suficiente para darnos una idea de cuánto pueden variar las condiciones durante un período interglacial; una interpretación más detallada de lo que se sabe de los últimos mil años, más o menos, permitirá apreciar en su justo valor las tribulaciones causadas por la variabilidad del tiempo en nuestro propio siglo.

Descifrar las complejidades de los cambios climáticos incluso para los últimos diez mil años implica la combinación y comparación de datos procedentes de muchos campos científicos. Hay, como veremos, datos históricos fiables que abarcan una sorprendente porción de este período, principalmente los de China. Sin embargo, la confección de un cuadro de conjunto se basa en estudiar el movimiento de los glaciares, puesto de manifiesto por las marcas que dejan en las rocas y los detritus que arrojan al fundirse; en medir los sutiles cambios de la composición del hielo que se está acumulando, año tras año, en las capas del glaciar de Groenlandia; en examinar los granos de polen en sedimentos de antiguos lechos lacustres, para descubrir las especies de plantas que florecían alrededor del lago hace miles de años; en contar los anillos de los troncos de árboles y medir su anchura, a fin de averiguar qué años en el pasado histórico fueron buenos para el crecimiento de los árboles y cuáles fueron malos, además en muchas otras técnicas. Algunas de ellas se describirán un poco más conforme avance la obra, pero hay que tener en cuenta que el libro trata de los cambios climáticos y no de las técnicas mediante las cuales éstos se miden, de modo que todos esos detalles han de pasar a un segundo término. La mejor fuente para hallar datos sobre los indicios del tiempo en el pasado y de las fluctuaciones climáticas es el segundo volumen de la épica obra de Hubert Lamb *Climate: Present, Past and Fu-*

ture: pero, dado que tiene 835 páginas (el volumen I, la descripción que el profesor Lamb hace del clima actual, es sólo un aperitivo de 613 páginas), difícilmente puede hacerse justicia a dicho tema en un solo capítulo del presente libro, aun pasando por alto los detalles. En términos esquemáticos, ha habido cuatro períodos bien marcados con sus propias características climáticas en los 10.000 años y pico transcurridos desde el final de la última glaciación, y la fase más cálida del presente período interglacial tuvo lugar hace no menos de 6.000 años.

Los cuatro períodos climáticos identificados por el profesor Lamb comienzan con la época cálida, que siguió y dio fin al último período glacial, la cual alcanzó su máximo hace de 5.000 a 7.000 años. Del 5000 al 3000 a.C., el nivel del mar subía rápidamente al fundirse las capas de hielo, el clima del Sahara era más húmedo que el actual, y la temperatura media en Norteamérica y Europa era unos dos o tres grados centígrados más alta que hoy día. Este «óptimo climático», como se lo llama algunas veces (considerando que unas condiciones más cálidas que las actuales serían más agradables), fue seguido de una época más fría que corresponde exactamente a la Edad del Hierro y que tuvo su peor período hace de 2.300 a 2.900 años: trajo no sólo enfriamiento, sino un gran aumento de la pluviosidad en todo el norte de Europa, desde Irlanda hasta Rusia, donde los grandes y sombríos bosques se extendieron hacia el sur a medida que las temperaturas estivales decrecían.

Tras un período frío de la Edad del Hierro, el siguiente hito climático corresponde a un intervalo cálido, menos notable que el «óptimo climático» posglacial y conocido por ello como el «pequeño óptimo climático», que alcanzó su cumbre a principios de la Edad Media, hace de 800 a 1.000 años. De esta época —del 1000 al 1200 d.C.— disponemos de valiosos datos históricos, así como de indicios arqueológicos y geológicos de más fácil interpretación, todos los cuales demuestran que la temperatura media de verano era aproximadamente un grado centígrado más alta que la actual en Europa y Norteamérica, y que la vid se cultivaba de 3 a 5 grados de latitud

más al norte que ahora, y de 100 a 200 m de mayor altitud sobre el nivel del mar. La última de las cuatro principales épocas del período interglacial se llama, adecuadamente, la «pequeña glaciación». Esta época de frío, más rigurosa que ninguna otra desde el período glacial propiamente dicho, presentó su máximo rigor hace de 550 a 125 años, pero algunos especialistas creen que no ha terminado todavía, y que, de la misma manera que los últimos 10.000 años templados marcan un intervalo temporal entre glaciaciones, el siglo XX puede representar, en una escala de tiempo más corta, un respiro temporal entre «pequeñas glaciaciones». Desde el siglo XV al XIX, pero con las peores condiciones en el siglo XVII, la «pequeña glaciación» provocó una extensión de los hielos árticos mucho más allá de sus límites durante el «pequeño óptimo climático», un desplazamiento general de las zonas climáticas hacia el ecuador en el hemisferio norte y una serie de dificultades diversas para la humanidad. Estas pueden apreciarse en su justo valor observando, no la totalidad del presente período interglacial, sino unos 5.000 años de historia escrita, desde los tiempos de Egipto y de la antigua Grecia hasta la sociedad global del siglo XX.

EL ESLABÓN DE 5.000 AÑOS

El eslabón que mantiene unidos los cinco mil años de historia es constituido por las variaciones en el vórtice circumpolar y en las trayectorias de los vientos del oeste portadores de lluvia, esta vez. no a través de la región africana del Sahel, sino a lo largo del Mediterráneo oriental y Grecia Reid Bryson, tal vez el más atrevido de esos modernos climatólogos que temen un retorno de la «pequeña glaciación», ha aceptado la sugerencia de Rhys Carpenter, especialista en estudios clásicos, quien sostenía que la decadencia de la gran civilización micénica, que floreció en el Egeo durante cientos de años en el segundo milenio a C. no se debió a la invasión y las guerras, sino simplemente a la sequía: un cambio en las características del tiempo que se produjo bruscamente hacia el

año 1200 a.C. En su libro *Climates of Hunger* (Climas de hambre). Bryson describe la manera en que los climatólogos de la Universidad de Wisconsin, en Madison (EE.UU.), emplearon un computador para simular las características de la distribución pluvial sobre Grecia en la actualidad y para averiguar cómo cambiarían éstas al variar las trayectorias de las depresiones. Descubrieron que una desviación hacia el norte de la trayectoria de las depresiones produciría exactamente las características de la sequía que Carpenter precisaba para explicar el colapso de la civilización micénica. y que precisamente la misma variación del vórtice circumpolar, hacia el año 1200 a.C., podría justificar sequías y el hambre del imperio hitita. Los hititas se trasladaron a lo que hoy es Siria: y esas mismas simulaciones por computador muestran que las variaciones en la configuración circumpolar que causaron la sequía en Micenas casi con seguridad tuvieron como resultado un aumento del 40% de lluvia en la región del noroeste de Siria y el centro de Turquía.

Cuando se trata de historia tan antigua, por supuesto, nada concluyente puede probarse, ni en un sentido ni en otro. Sin embargo, es evidente que las grandes emigraciones y la decadencia de civilizaciones en el Mediterráneo oriental justo después del año 1200 a.C. encaja exactamente con la pauta de cambios pluviales asociados a una ligera contracción del vórtice circumpolar (fig. 2-2). Otros indicios de la época clásica proporcionan pruebas menos ambiguas del cambio climático: Lamb, por ejemplo, menciona las minas de oro romanas a gran altura en los Alpes austríacos, que sólo ahora se están descubriendo tras la retirada de los hielos que siguió a la última «pequeña glaciación». Evidentemente, los glaciares no importunaban a los mineros romanos, o de lo contrario éstos nunca podrían haber explota do las minas: por otra parte, en el siglo I a.C., los escritores romanos de te mas agrícolas explicaron cómo el cultivo del olivo y la vid se estaba extendiendo más hacia el norte en Italia, en regiones donde en el siglo anterior los inviernos habían sido demasiado fríos para la supervivencia de esas plantas trasplantadas desde el sur.

Más próximo a nosotros, el siguiente intervalo cálido, el «pequeño óptimo», proporciona a los climatólogos una «mina de oro» de distinta clase, con una casi abrumadora riqueza de información sobre el modo en que los cambios climáticos afectaron a las poblaciones hacia el año 1000 d.C. El calor en Europa entre los años 1000 y 1300 d.C. fue acompañado de inviernos suaves y lluviosos que hacían crecer los ríos, al igual que ocurrió durante una época templada de menor importancia en el siglo I de la era cristiana. Al proporcionar un eslabón entre la época de los romanos y la Edad Media, esas variaciones climáticas explican la existencia, de otro modo desconcertante, de puentes romanos sobre barrancos y torrenteras árabes que están ahora secos, y del notable puente de cinco arcos, el Ponte dell Ammiraglio, construido en Palermo (Sicilia) en 1113 para atravesar un río entonces navegable que es ahora apenas un arroyuelo. Para cualquier habitante de las regiones lindantes con el Atlántico Norte, las sagas de los marinos nórdicos aportan uno de los más extraordinarios indicios de cómo el clima de su tiempo difería del actual. Asimismo, dan también la oportunidad de explicar con algunos detalles una de las más importantes técnicas para descifrar variaciones climáticas pasadas, el estudio de los isótopos del oxígeno encerrados en forma de hielo en el casquete groenlandés.

LOS TRIUNFOS DE LOS VIKINGOS

El estudio del hielo proporciona un termómetro para medir las variaciones de temperatura de un año a otro a lo largo de cientos de años, ya que el oxígeno se da en dos variedades comunes, llamadas isótopos. El más corriente de los dos es con mucho el oxígeno 16, cuyo peso es de 16 unidades en la escala de pesos atómicos; su contrapartida, más raro y pesado, es el oxígeno 18, que supera en dos unidades de peso al oxígeno 16, pero que es químicamente idéntico a él. Ambos tipos de átomos de oxígeno se combinan con el hidrógeno para formar moléculas de agua (H_2O), de modo que el agua del

mar se da también en dos variedades, una de las cuales pesa dos unidades más que la otra. El agua que llega a la atmósfera para formar nubes y caer después en forma de lluvia o nieve ha de contener también ambos tipos de moléculas, pero se necesita una mayor cantidad de energía para evaporar las moléculas más pesadas que para evaporar las más ligeras El resultado es que la proporción de las dos variedades que se evaporan cada año, y por tanto la proporción de las dos variedades depositadas en el casquete de hielo de Groenlandia cuando nieva, depende de la temperatura media de ese año. Esto sería meramente una fascinante rareza de la naturaleza si no fuera por el hecho de que la nieve que cae sobre el casquete de hielo cada año forma su propia capa distintiva, que se comprime para formar hielo a medida que cae encima de ella más nieve, de modo que la edad de las muestras de hielo extraídas de la profundidad del casquete se puede leer contando las capas desde abajo hasta arriba, de forma muy parecida a como puede determinarse la edad de un árbol calculando el número de capas de madera formadas en sus anillos de crecimiento anuales. Así pues, si se perfora el casquete de hielo y se extrae una muestra de él, se cuentan las capas y se analiza la composición isotópica del hielo de diferentes capas, es posible determinar la temperatura media de cualquier año durante el tiempo en que se estaba depositando el hielo.

Por supuesto, la técnica es laboriosa y lleva consigo cuidadosos análisis químicos. Aun así, el danés Willi Dansgaard y sus colegas han sido capaces de analizar de esta manera un cilindro de hielo de 404 m de largo, extraído del casquete de hielo groenlandés, el cual representa 1.420 años de historia. Este tiempo es suficiente para proporcionar una descripción de los cambios de temperatura año por año durante el «pequeño óptimo» y la «pequeña glaciación»; además, el equipo de Dansgaard ha comparado su estudio con una relación detallada del desarrollo y desaparición de las colonias nórdicas en Islandia y Groenlandia extraída de las sagas *Landnam* y *Greenlander.*

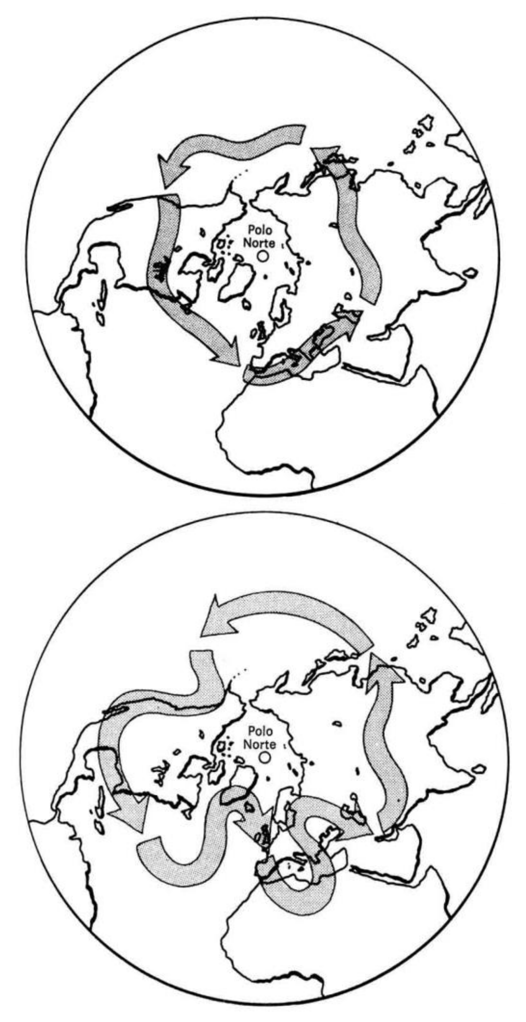


Fig. 2-2. Como una serpiente persiguiendo su propia cola, la configuración de vientos del oeste se ondula alrededor del globo, siguiendo la trayectoria de la corriente en chorro en la alta troposfera. Una circulación intensa corresponde a un vórtice circumpolar comprimido; una circulación débil corresponde a una corriente en chorro de movimiento ondulatorio más irregular. Tales configuraciones afectan al clima de todo el hemisferio norte.

Dejando aparte, por el momento, la causa de esos cambios climáticos, su influencia sobre la sociedad nórdica es evidente. El primer intento conocido de establecerse en Islandia corresponde a un agricultor llamado Floke Vilgerdson en el año 865 d.C. Su intento fracasó, pues, aunque Vilgerdson no podía saberlo, había escogido la parte final de una serie de pequeñas fluctuaciones frías, y perdió todo su ganado en un duro invierno. A su regreso a Noruega, explicó cómo había encontrado «un fiordo lleno de hielo marino... y por tanto llamó al país Islandia [«Island» tierra de hielos]» *(Landnam Saga).* Sólo nueve años más tarde, en 874, nuevos colonos se establecieron con éxito en Islandia y prosperaron en el rápido calentamiento climático correspondiente al «pequeño óptimo», lo que se demuestra claramente en el registro isotópico (fig. 2-3). Un siglo más tarde, en 985, la colonia era tan segura que sirvió de trampolín a posteriores aventuras coloniales, cuando el pionero Erik el Rojo fundó una colonia hija en Groenlandia. La *Greenlander Saga* nos dice que Erik eligió («Gronland». tierra verde) como un truco deliberado para animar a sus seguidores a establecerse en aquella helada e inhóspita isla; pero probablemente la saga le juzga mal, ya que las pruebas de los isótopos del casquete de hielo indican que Erik alcanzó Groenlandia hacia finales de un período cálido más largo que ninguno de los que hasta entonces se habían producido allí, cuando al menos la franja costera debió de aparecer verde y ubérrima juzgada con los austeros criterios a que los aventureros vikingos estaban habituados. Aunque ni Groenlandia ni Islandia son lugares particularmente acogedores, de hecho, hoy día, tendría más sentido intercambiar sus nombres; al parecer, adquirieron sus engañosos apelativos en gran parte debido a los caprichos de los cambios climáticos en la época de su descubrimiento y colonización.

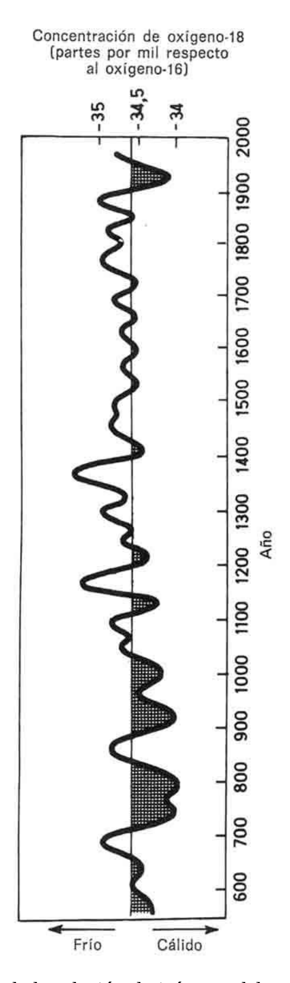


Fig. 2-3. Las medidas de la relación de isótopos del oxígeno en muestras de hielo extraídas del casquete de hielo groenlandés proporcionan una guía precisa sobre las variaciones de temperatura en la región del Atlántico Norte en tiempos históricos. Éstas guardan una extraordinaria relación con acontecimientos históricos, tales como la colonización de Groenlandia por los nórdicos y la subsiguiente desaparición de la colonia cuando empeoró el clima. (Basado en datos del equipo de Willi Dansgaard citado en el texto.)

Uno de los primeros comerciantes que navegaron por la nueva ruta de Islandia a Groenlandia. Bjarni Herjolfsson, fue desviado por los vientos tan lejos de su rumbo que, en lugar de arribar a Groenlandia, llegó a América, si bien no se detuvo en desembarcar. Esto correspondió a Leiv Eriksson, el hijo de Erik el Rojo, en la última década del siglo X. La historia de Viniandia, casi inimaginablemente fértil y agradable en comparación con Groenlandia, es ahora familiar, y parece que algunas colonias nórdicas llegaron a establecerse en el continente norteamericano. Sin embargo, hacia el año 1200 el panorama climático empezó a cambiar, y, en el siglo XIV, la colonia groenlandesa había desaparecido como consecuencia del comienzo de la «pequeña glaciación». Lejos de su patria, los nórdicos supervivientes en Norteamérica murieron o fueron eliminados absorbidos por las tribus americanas nativas. Incluso la colonia de Islandia, mucho más próxima a Europa, sobrevivió a duras penas durante la peor época de la «pequeña glaciación», mantenida únicamente por su importancia como base para los buques balleneros de la época. Con anterioridad al 1200, la avena y la cebada se cultivaban en Islandia, pero al mismo tiempo que las sagas hablan por primera vez de las dificultades de las colonias del oeste y del aumento del hielo en la corriente oriental de Groenlandia, se abandonó la avena y la cantidad de cebada cosechada cada año disminuyó en un 50%.

LA SITUACIÓN EN NORTEAMÉRICA

Las variaciones climáticas afectaron también al continente norteamericano de formas que pueden ser hoy muy significativas. Los indicios geológicos de la región occidental de las Grandes Llanuras *(Great Plains)*, del alto valle del Mississippi y de la seca región suroeste de lo que es ahora Estados Unidos revelan que había existido allí un clima más húmedo que el actual, quizá durante los 500 años anteriores al cambio climático que tuvo lugar en el año 1200 d.C. Mientras los nórdicos se beneficiaban de una retirada de los hielos marinos

y de condiciones más templadas en el Atlántico Norte, las tribus nativas americanas se trasladaron al norte y el oeste, penetrando en el actual Wisconsin antes del año 800, y numerosas colonias de agricultores se extendieron hacia los valles de Minnesota oriental. El pueblo de Mill Creek fue uno de los muchos grupos establecidos en las llanuras del este de las Montañas Rocosas hacia el año 900, y en 1200 constituía una población relativamente rica, que vivía en una región de praderas de alta hierba con valles boscosos. Cultivaban maíz y cazaban ciervos, y vivían en comunidades sedentarias muy diferentes de las formas de vida nómadas de los «Pieles Rojas» que nos presentan en las películas. Sin embargo, todo esto cambió en sólo un par de decenios a principios del siglo XIII. Bryson, que vive y trabaja en Wisconsin, ha realizado un interesante estudio de los factores climáticos que causaron el espectacular cambio en la forma de vida de los pobladores de la región de Mili Creek hace unos 800 años. De nuevo, interviene la dilatación del vórtice circumpolar que empuja el cinturón de vientos del oeste, portadores de lluvia, más hacia el sur. Al desaparecer las lluvias, las altas hierbas fueron remplazadas por hierbas cortas, mientras que, a lo largo de un período mayor de tiempo, incluso los árboles murieron y las llanuras se hicieron más abiertas. Los ciervos abandonaron la región, las cosechas se perdieron y las comunidades sedentarias de ricos agricultores fueron sustituidas por una sociedad trashumante y cazadora dependiente del bisonte como fuente segura de alimento, así como de cuero y huesos. Hay un gran interés en la preocupación de Bryson por el destino del pueblo de Mill Creek, ya que las pruebas arqueológicas muestran que se trataba sólo de un grupo de víctimas de una sequía que duró dos siglos en toda la región que hoy constituye el granero clave de Norteamérica, el cesto de pan del mundo. La secuencia de variaciones pluviales asociadas a la configuración del vórtice circumpolar se vislumbra en el archivo arqueológico de los tiempos a través de Norteamérica y se extiende hasta el sur de Illinois, donde hacia el año 1000 de la era cristiana existía lo que Bryson describe como «uno de los centros de población importantes del mundo», una civiliza-

ción que cultivaba maíz a lo largo del fértil valle del Mississippi y que tenía recursos para levantar grandes construcciones de tierra reminiscentes de las pirámides de Egipto.

Aunque estos montículos no eran de piedra, su existencia nos dice que, como en el antiguo Egipto, esta civilización nativa era lo bastante rica como para poder alimentar a un ejército de trabajadores que realizaban trabajos sin valor práctico inmediato, y que existía una estructura de poder con una autoridad central lo suficientemente fuerte como para garantizar que estos trabajos se llevaran a cabo. La estructura subsistente más grande de aquel tiempo. Monks Mound, alcanza 35 m de altura sobre la llanura circundante y mide 330 × 230 m; la región que rodea Monks Mound, ahora llamada Cahokia, fue el centro de una floreciente civilización desde el año 600 al 1200 de nuestra era (como Bryson hace notar, un intervalo de tiempo más largo que el que media desde Colón a nuestros días). Las poblaciones de Cahokia fueron también víctimas de la «pequeña glaciación», aunque, como en el caso del pueblo de Mill Creek, un nombre más apropiado desde su punto de vista sería el de «período de la gran sequía».

EL TÁMESIS SE HIELA

Volveremos más adelante a las praderas de Norteamérica, pues ésta es una región productora de prácticamente todos los alimentos que se cotizan hoy en los mercados mundiales o que se ofrecen como ayuda a pueblos necesitados. La razón de por qué la «pequeña glaciación» recibió este nombre, sin embargo, se entiende mejor al otro lado del Atlántico, donde uno de los más fidedignos indicadores climáticos de la historia lo proporcionan las heladas del río Támesis. Durante los primeros mil años de la era cristiana, el río se heló por término medio sólo una vez cada siglo a la altura de Londres. En 1209 se edificó el famoso puente de Londres, y a partir de entonces una combinación del puente y los cambios climáticos alteró espectacularmente la situación.

La maciza construcción del puente tuvo su importancia, ya que había más puente que espacios vacíos para que pasara el agua, con el resultado de que ésta se acumulaba corriente arriba, fluyendo a través de los arcos como una cascada cuando el río venía alto. En invierno se acumulaban en el puente ramas y otros residuos, y el hielo que se formaba se convertía pronto en una sólida plataforma que se extendía corriente arriba, aumentando de espesor en muchas ocasiones a medio metro o más y siendo lo suficientemente sólida no sólo para caminar sobre ella, sino para que los caballos y carruajes cruzaran el río a través de ella. Desde principios del siglo XIII en adelante, los datos de las heladas del Támesis proporcionan una clara guía de la evolución de la «pequeña glaciación».

En 1269-70, el Támesis se heló no sólo corriente arriba junto al puente, sino a tanta distancia corriente abajo que las mercancías normalmente transportadas desde la costa en barcos tuvieron que ser enviadas por tierra: heladas menos importantes en 1281-82 y en 1309-10 fueron seguidas de un siglo de clima más templado, pero entre 1407-08 y 1564-65 el río se heló al menos seis veces. El rey Enrique VIII condujo su carruaje sobre el río en 1536-37 o en 1537-38 (los datos son confusos respecto a la fecha exacta), y la reina Isabel I solía pasear sobre la helada superficie del Támesis en el invierno de 1564. En el siglo XVII, el río empezó a utilizarse casi como una pista normal de deportes de invierno, y se estableció la primera «Feria del Hielo» en una «ciudad» de tiendas de campaña montadas sobre el hielo en 1607-08. En los puestos de la feria se vendían alimentos, cerveza y vino: había juegos de bolos, tiro al blanco y baile sobre el hielo como diversiones. Tras otra feria del hielo en 1620-21, se introdujo en Inglaterra el deporte del patinaje sobre hielo en 1662-63, cuando se heló de nuevo el Támesis. La más importante de todas las ferias del hielo tuvo lugar en 1683-84, y otra casi igual en 1688-89. En total, el río se heló diez veces durante el siglo XVII y diez veces más entre 1708-09 y 1813-14; desde entonces nunca se ha llegado a helar del todo.

Esto se debe en parte a que ya no existe el viejo puente y a que la contaminación industria) y el calor sobrante que inundan el río indican que éste no se hubiera helado ni aunque hubiese habido un invierno tan riguroso como el de 1683-84 a finales del siglo XIX, pero también es debido en parte al importante calentamiento que anunció el siglo XX. En los archivos de toda Europa se observa un patrón semejante, con muchos lagos y ríos helados en las peores décadas de la «pequeña glaciación», en especial las del siglo XVII. Más hacia el sur, como ocurre en Norteamérica, la historia es más bien de variaciones pluviales que de cambios de temperatura. En la Edad Media, el norte de África, incluyendo el borde del Sahara, era más húmedo que hoy, pero durante la «pequeña glaciación» fue más seco. Entre las variaciones climáticas, la importancia de cada una de ellas depende de los intereses personales de los especialistas que las estudian; lo que realmente importa es que todas ellas encajan en un patrón claro que lleva consigo cambios en la circulación general del hemisferio norte (la del hemisferio sur también varió, pero los datos correspondientes son mucho más incompletos). La «pequeña glaciación», pese a su nombre, no fue una época de frío intenso, y muchos veranos de Europa en la segunda mitad del siglo XVII fueron secos y cálidos, constituyendo la sequía un auténtico problema. La peste y el gran incendio de Londres, que tuvo lugar en 1666 y cuya furia se abatió sobre la ciudad durante cinco días, destruyendo 14.000 edificios y dejando sin vivienda a 200.000 personas, están históricamente asociados con las sequías de la «pequeña glaciación». Hubert Lamb ha recopilado todos los testimonios, y su conclusión es que, en los veranos del periodo del «pequeño óptimo», la parte principal de los fuertes vientos del oeste en la alta troposfera soplaban de 3 a 5° de latitud más al norte que en la época actual, mientras que, en el período más frío de 1550 a 1700, la corriente principal del vórtice circumpolar soplaba de latitud más al sur que a mediados del siglo XX. Como resultado. Europa era en conjunto más húmeda, aunque hubiera años de sequía, y las Grandes Llanuras de Norteamérica, como hemos visto, se volvieron más secas en la parte de la «sombra» de

lluvia producida por las Montañas Rocosas. La «pequeña glaciación» en Europa tendía hacia veranos más húmedos e inviernos más rigurosos, una característica tan familiar para los europeos en la década de 1980 como la sequía pata los norteamericanos de hoy. Sin embargo, también había, en palabras de Lamb (p. 465), «una variabilidad de temperatura incrementada de temporada a temporada, de un año a otro y en períodos de tiempo algo más largos. *Esto es característico de regímenes con frecuentes situaciones de bloqueo...»* (la cursiva es del presente autor). «Pese a ciertas temporadas de frío nunca vistas, se registraron también períodos de gran calor en Inglaterra». El cuadro en conjunto, dice Lamb, muestra que la «pequeña glaciación» fue una época de «configuraciones de la circulación atmosférica asociadas a un casquete polar extendido, un vórtice circumpolar dilatado, frecuentes situaciones de bloqueo…». No es de extrañar que Bryson y sus colegas estén alarmados por recientes acontecimientos que han coincidido con un vórtice circumpolar dilatado (causante de sequía en el Sahel) y frecuentes situaciones de bloqueo, las cuales han dado lugar, entre otras cosas, al verano más cálido en Inglaterra desde que se tienen datos («períodos de gran calor…»), rigurosos inviernos en Europa y Norteamérica («las épocas más frías que se conocen...») y un retorno de las condiciones de sequía en las Grandes Llanuras de Estados Unidos. Estos acontecimientos parecen un sombrío eco del cuadro climático de la «pequeña glaciación».

El tiempo duro en Europa dejó su marca en la sociedad, marca que persiste en el presente. Fue durante la peor época de la «pequeña glaciación» cuando Jacobo VI de Escocia, entonces también rey de Inglaterra con el nombre de Jacobo I, dispuso que se estableciera una colonia de sus súbditos escoceses en Ulster, en el norte de Irlanda, hecho que todavía hoy tiene repercusiones en las dificultades de dicha provincia. Pueblos enteros de Inglaterra, especialmente de East Anglia, se despoblaron y dejaron de existir, no a causa de la peste negra, como muchos historiadores creían, sino por la pérdida de cosechas y el hambre causados por los cambios climáticos. El escrutinio actual de los datos muestra una y otra vez que la

población local declinó y sufrió inanición en primer lugar, y que luego la peste causó su efecto entre los depauperados supervivientes, en lugar de haber sido dicha plaga la principal causa de la catástrofe. Estos sucesos han dejado su impronta en los vacíos y todavía poco poblados distritos de la región actual.

SEQUÍAS AMERICANAS

Desde comienzos del siglo XIX, las condiciones han cambiado de nuevo. El vórtice circumpolar parece que se ha retirado un poco, con todo lo que ello implica. La «pequeña glaciación» se muestra como un período de frío y extremos climáticos desacostumbrados, ya que las condiciones durante nuestras vidas han sido diferentes. Sin embargo, hay también indicios manifiestos de la tendencia a cambiar, tendencia que Bryson califica de «persistente y obvia». Las temperaturas del centro de Inglaterra, por ejemplo, ascendieron durante cien años desde 1850, y el período 1925-54 fue 1,5°C más cálido que los 25 años anteriores; la duración de la época de cultivo en Oxford (básicamente el intervalo entre finales de primavera y el comienzo de las escarchas otoñales) fue de dos a tres semanas más larga en la década de 1940 que en el siglo XIX; la temperatura media en Copenhague durante los años cincuenta fue 1,5°C más alta que en la década de 1850: los glaciares en Europa se contrajeron, y las temperaturas medias en Islandia aumentaron también aproximadamente 1,5°C. Todo esto, dice Bryson, pone de manifiesto que «los años de principios y mediados de nuestro siglo —tiempo en el que basamos nuestras ideas sobre el clima normal— han sido muy diferentes de los 300 años anteriores. Hemos tenido uno de los mode los climáticos menos normales de los últimos mil años, *no* el único modelo... la ilusión de que el clima es estable e invariable ha llegado a ser insostenible» (págs. 90-91, *Climates of Hunger).* Lo que hace esto doblemente frustrante es que los datos exactos de la región agrícola más significativa del mundo actual, las Grandes Llanuras de Estados Uni-

dos, no se empezaron a registrar hasta la segunda mitad del siglo XIX. Sin embargo, podemos hacernos una idea del clima normal de aquella importantísima región, desde la perspectiva del clima de los pasados mil años, más o menos, estudiando la historia de las exploraciones hacia el oeste, que comienza con la expedición del comandante Stephen H. Long en 1819-20. La más notable característica del informe de Long sobre las altas llanuras es el nombre que les da, basado en sus primeras impresiones: el gran desierto americano.

La expedición de Long fue seguida por otras, pero la región permaneció en gran parte sin colonizar hasta la década de 1850, cuando el teniente G. K. Warren informó a Washington de que el límite occidental de la tierra cultivable se podía identificar con el meridiano 97, que pasa aproximadamente por Wichita. Kansas y Lincoln (Nebraska). Warren describió las tierras al oeste de 97 como un «espacio desierto» que separaba la zona agrícola oriental de las fértiles tierras de la costa del Pacífico, y el comandante John Wesley Powell, el primer director del Geological Survey de los Estados Unidos, concordaba con este punto de vista en su «Informe sobre las tierras de la región árida de Estados Unidos» publicado en 1875, afirmando que la lluvia era insuficiente para mantener la agricultura sin irrigación al oeste del meridiano 100°.

Así pues, hace poco más de cien años, e inmediatamente después de la guerra civil, la opinión científica confirmaba unánimemente la existencia del gran desierto americano. Los pioneros que junto con el ferrocarril iban avanzando hacia el oeste hicieron, sin embargo, caso omiso de la opinión científica, y en el estado de ánimo optimista y expansivo de la nación al terminar la guerra civil, el tópico en labios de mucha gente, como una generación antes lo había sido en tiempos de la guerra con México, era el «manifiesto destino» de la nación a extenderse hacia el oeste. Los pioneros tuvieron suerte... al principio. En la década de 1880, coincidiendo aproximadamente con el establecimiento de una red de estaciones de observación meteorológica, la lluvia en la región de las altiplanicies, aunque nunca muy de fiar, aumentó ligeramente, dando lugar a la curiosa teoría de que «la lluvia sigue

a la roturación» y de que, por consiguiente, al explotar la agricultura en la región, los pioneros estimulaban en cierto modo el aumento de la lluvia. No obstante, ominosos avisos ya en 1889, a medida que retornaban las condiciones de tiempo seco en las llanuras, y una intensa sequía a principios de la década de 1890 dieron lugar al abandono de muchos caseríos y a la creación de ciudades fantasmales. Las técnicas agrícolas del este habían mostrado realmente que eran impracticables en las altas llanuras.

Cuando las sequías se atenuaron, avanzó una nueva ola de colonizadores, y durante la primera mitad del siglo XX se cultivaron las llanuras con cierto éxito, no con los métodos tradicionales del este, sino mediante el cultivo de enormes extensiones de pradera y el uso creciente de la mecanización. Parecía como si la tecnología pudiera superar las condiciones de aridez... hasta la década de 1930. Las llanuras que hasta entonces habían estado protegidas por una espesa alfombra de hierba fueron después sometidas al arado, y yacían inermes a merced de los vientos, que arrastraban la fértil capa superior a io largo de centenares de kilómetros. Las llanuras nunca se han llegado a recuperar realmente de aquella sequía, a pesar de los esfuerzos para restablecer la capa de hierba y plantar árboles que hagan de cortavientos: tales esfuerzos han sido dificultados por ulteriores sequías en los años cincuenta y setenta. Más adelante volveremos a tener noticia de este ciclo de sequía de unos 20 años de duración, junto con crecientes pruebas científicas de que el ciclo no se ha acabado todavía, sino que se espera que traiga nuevas condiciones de sequía al gran desierto americano a principios de los años noventa. Los archivos detallados anteriores a 1872, cuando se fundó el Weather Bureau (Oficina meteorológica) de Estados Unidos (ahora U. S. Weather Service. Servicio meteorológico nacional) son escasos y difíciles de encontrar, pero todos los indicios muestran que, durante el siglo XX, una región que había sido árida e inadecuada para la agricultura mejoró climáticamente lo suficiente para hacer posibles los cultivos durante los años buenos, si bien no durante los años más secos del ciclo de lluvias. La misma pauta de una ligera mejoría climá-

tica en Norteamérica durante el siglo XX, se hace patente en los limitados datos de temperatura disponibles, que han sido estudiados por los meteorólogos de la University of Wisconsin-Madison. Se dispone de algunos datos de temperatura, por ejemplo, en Fort Winnebago, cerca de Portage (Wisconsin), para el período de 1829-42. Cuando estos datos se comparan con los registros de temperatura de Portage correspondientes al período de 1931 a 1948, muestran que en todos los meses del año, salvo en marzo, el período del siglo XIX era más frío, especialmente en agosto (5,1°C más frío), septiembre (6,9°C más frío), octubre (4,5°C más frío) y noviembre (5°C más frío). Además, las observaciones de los vientos en Fort Winnebago muestran que los del noroeste y los del este eran mucho más frecuentes en el siglo XIX. Todos estos datos encajan exactamente en el cuadro de un vórtice circumpolar dilatado durante el siglo pasado, como consecuencia de la «pequeña glaciación». La pregunta crucial es ésta: ¿Ha significado la mejoría del siglo XX, producida por una contracción del vórtice circumpolar, el fin real de la «pequeña glaciación»? ¿O bien los decenios recientes han constituido un simple respiro temporal, con la perspectiva de una nueva dilatación del vórtice circumpolar, un retorno al tiempo de! siglo XIX, o incluso a la «pequeña glaciación», a la vuelta de la esquina?

EL ENFRIAMIENTO EN LA ACTUALIDAD

No hay duda de que el calentamiento de principios del siglo XX fue seguido de un enfriamiento que se estableció en el hemisferio norte antes de 1950 Los climatólogos deliberan sobre si está tendencia al enfriamiento va a continuar o si tal vez está mostrando ya un cambio de signo. Este tema de controversia, y la posibilidad de que cualquier tendencia al enfriamiento pueda ser compensada por la influencia de las actividades humanas sobre el clima, es de lo que trata este libro. Sin embargo. Hubert Lamb describe el enfriamiento desde comienzos de los años cuarenta hasta al menos 1975

como «la tendencia descendente de mayor duración para esta variable desde 1700» (p. 529), con el máximo enfriamiento en el Ártico. Entre 1968-72. la temperatura media en cinco años en el Atlántico Norte medida por nueve barcos meteorológicos estacionados entre 33 y 66°N fue 0,56°C más baja que la temperatura media equivalente para el período 1951-55; éstas y otras medidas, dice Lamb, aportan pruebas de «una circulación global atmosférica debilitada en la última o dos últimas décadas» (p. 535). Escribiendo esto poco antes de algunos de los recientes sucesos de extremos climáticos que desde entonces han aparecido en los titulares de la prensa, pudo, sin embargo, decir que «los años 1962-75 han sido testigos de muchas marcas de temperatura, valores extremos tanto de máximas como de mínimas, en las latitudes medias del hemisferio norte, las cuales sólo pudieron ser igualadas, si llegaron a serlo, de 200 a 220 años antes». Este comentario es interesante por muchas razones. En primer lugar, como espero que quede claro después de las pruebas presentadas en el capítulo anterior y en éste, los valores extremos de *ambas* clases se dan con mayor frecuencia cuando la Tierra se enfría y el vórtice global es débil, ya que entonces pueden establecerse los anticiclones de bloqueo. Cuando la Tierra está caliente y la circulación es intensa pero sigue fielmente un paralelo alrededor del polo, las condiciones tienden a ser moderadas, con menos extremos de temperatura y lluvias más previsibles para los agricultores en las latitudes medias. En segundo lugar, aunque con un argumento menos sólido que la mayor parte de las pruebas de variabilidad climática que he mencionado hasta ahora, existe al menos un indicio procedente de largos archivos climáticos, tales como los isótopos en el cilindro de hielo groenlandés, de un ritmo reiterativo en el clima, así puesto de manifiesto en las fluctuaciones de temperatura, de unos 200 años de duración, tal vez un poco menos Y en tercer lugar, la ocasional observación de Lamb —casi indiferente— de que el período 1962-75 marcó una serie de extremos climáticos sin precedentes en 200 años, preparó fantásticamente la escena para un estudio llevado a cabo por John Kington, de la University of East Anglia, que se dio a conocer a fina les de 1979

y que mostró que la pauta climática de la década de 1780, cuando se estudia en detalle, muestra una mayor similitud con la pauta de los diez años desde 1968 a 1978 que con ninguna otra década en el período entre ambas. Volviendo del revés tal descripción, el estudio de Kington nos dice que la década de 1970 se parecía más a un decenio típico de la última parte de la «pequeña glaciación» que a ningún otro decenio de la mejoría climática posterior. Vale la pena examinar este análisis con más detalle, ya que sugiere así de claro que las condiciones de la «pequeña glaciación» están realmente retornando. De hecho, todas las pruebas provienen de Europa, ya que desgraciadamente no había meteorólogos en las altiplanicies norteamericanas en la década de 1780. Sin embargo, como ahora está claro que el funcionamiento de la atmósfera está interconectado, y que la característica clave en una escala de tiempo de décadas o siglos son las variaciones del vórtice circumpolar, los datos europeos son lo bastante fidedignos como para dar una señal de alarma.

VUELVE EL TIEMPO DEL SIGLO XVIII

En el verano de 1979, una conferencia celebrada en la University of East Anglia en Norwich (Inglaterra) protagonizó la primera reunión formal de historiadores y climatólogos de todo el mundo para examinar el rompecabezas de los cambios climáticos en tiempos históricos y su influencia sobre la humanidad. En esa reunión, al enfrentarse con pruebas del tipo de las que se presentan en este capítulo pero con mayor detalle, muchos de los climatólogos salieron de ella con una opinión general de que. si bien el efecto del calentamiento debido al aumento del dióxido de carbono en la atmósfera —el efecto invernadero— puede pronto llegar a ejercer una influencia real en el clima, la amenaza inmediata, al menos para la próxima década, es la de una continuación del retorno hacia las condiciones meteorológicas más frías e irregulares de la «pequeña glaciación». El profesor Lamb señaló que, según las pruebas disponibles, parecía que quienes hacen

planes preparándose para los probables extremos climáticos del futuro inmediato —digamos los próximos diez años— podrían sacar mayor provecho si estudiaran los archivos climáticos de los siglos XVII y XVIII en lugar de confiar en los registros, de más fácil acceso y más detallados, del clima «normal» de los pasados cien años más o menos. El estudio de John Kington acabó de redondear el resumen de la situación debido a Lamb.

El estudio de Kington forma parte de un esfuerzo continuado y a largo plazo por parte de los climatólogos de la University of East Anglia para llenar el hueco en nuestro conocimiento de los climas del pasado, desde la época de la invención del termómetro y el barómetro, en la transición de los siglos XVI a XVII, hasta la introducción del telégrafo eléctrico en la década de 1850. Antes de 1850 era imposible tratar de predecir el tiempo de la manera como se hace actualmente, utilizando mapas de la distribución de la presión y temperatura de hoy (mapas sinópticos), como base para predecir el tiempo de mañana. Durante todo el siglo XVIII, en distintos puntos de Europa se empezó a recopilar datos cada vez mejores de la temperatura y la presión, pero, en los tiempos anteriores al telégrafo, un meteorólogo no podía reunir estas observaciones con la suficiente rapidez para que fueran de utilidad en predicción. La diligencia o la paloma mensajera podían hacerle llegar la información, y él podía usarla para construir un mapa del tiempo; pero, para cuando lo consiguiera, el mapa tendría varios días de antigüedad Así, el siglo anterior a la introducción del telégrafo proporciona un interesante campo de investigación para los estudiantes de climatología histórica. Los datos necesarios para construir los mapas existen, pero, en conjunto, los mapas nunca se han construido. El equipo de Kington se propone finalmente llenar este hueco reconstruyendo los mapas sinópticos de la totalidad del período, con lo que se duplicaría la longitud del registro disponible de los detalles de las variaciones del tiempo en Europa y se tendría una guía mucho más fidedigna sobre lo que realmente significa tiempo normal. El equipo decidió iniciar su exploración con la década de 1780, en parte porque los primeros

intentos de reconstruir pautas históricas del tiempo fueron hechos por el meteorólogo alemán H. W. Brandes para ese período en 1820, y en parte porque las pruebas históricas ya insinuaban que el decenio se había caracterizado por algunos interesantes extremos climáticos. Cuando se empezó a trabajar sobre este proyecto en Norwich, a principios de los años setenta, los climatólogos de Kington no sabían que el mundo ya estaba al borde de un decenio de semejante variabilidad climática.

Sin embargo, aunque los datos están disponibles, para los historiadores no es una tarea fácil obtenerlos y elaborarlos de forma aprovechable. Las fuentes detalladas incluyen archivos de la Société Royale de Médicine (SRM) de Francia, de una red de estaciones de observación establecida para investigar posibles efectos del tiempo y el clima sobre las enfermedades y epidemias. En Alemania, el elector Karl Theodor del palatinado del Rhin estableció en 1780 una red de observación bajo la organización de la Societas Meteorológica Palatina (SMP), usando instrumentos normalizados, y dicha red se extendió con el tiempo a través de Europa hasta Rusia y sobre el Atlántico hasta Groenlandia y Norteamérica. En Gran Bretaña y Escandinavia se había empezado ya a efectuar observaciones oficiales, junto con las regulares hechas por personas interesadas y registradas en diarios y archivos particulares. Los cuadernos de bitácora conservados de los buques de guerra británicos y de otras armadas proporcionan también observaciones diarias (e incluso horarias) de las condiciones meteorológicas, y son muy útiles porque extienden su alcance a los mares. Finalmente, informes de agricultores y comerciantes ayudan a llenar huecos en el registro detallado.

La recopilación de estos datos ha corrido a cargo del Climatic Research Unit (Unidad de Investigación Climática) de la University of East Anglia en búsquedas de bibliotecas de toda Europa, así como en extensa correspondencia con bibliotecas e individuos. El resultado es una gran cantidad de material, con frecuencia escrito a mano, en diferentes idiomas, formatos y unidades de medida, y de diversa calidad. No es pues sorprendente que, aunque el proyecto se concibiera hace

más de diez años, sólo recientemente hayan podido publicarse los primeros resultados detallados para el primer quinquenio del decenio estudiado. El equipo merece el golpe de suerte de que la investigación de la década de 1780 venga a decirnos gran parte de lo que está sucediendo al tiempo en nuestros días: aunque estudios similares de otros decenios se efectuarán con mayor rapidez ahora que se ha hecho el trabajo básico, en la actualidad, el estudio de la década de 1780 sigue siendo una pieza única de reconstrucción histórica, merecedora de especial mención por su propio interés y porque será un espejo de los años setenta.

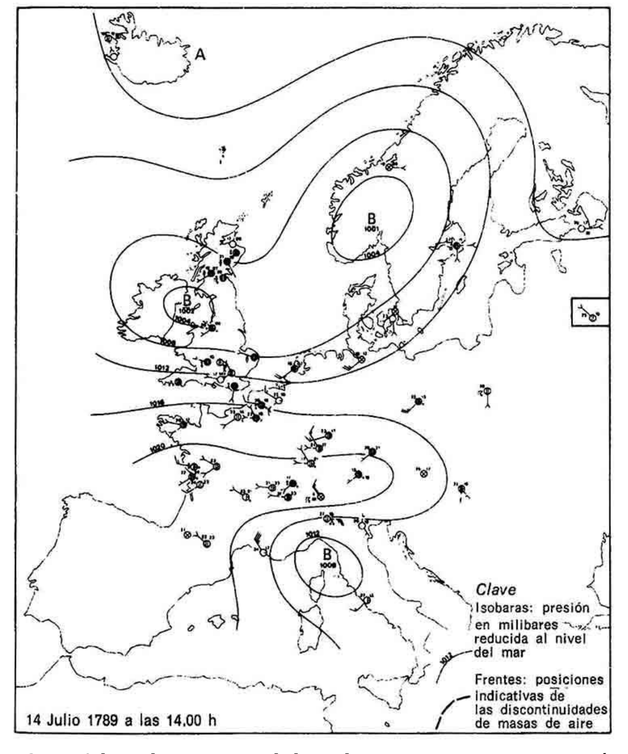


Fig. 2-4. «Adecuado para actividades a la intemperie». Reconstrucción de John Kington del mapa del tiempo el día de la toma de la Bastilla.

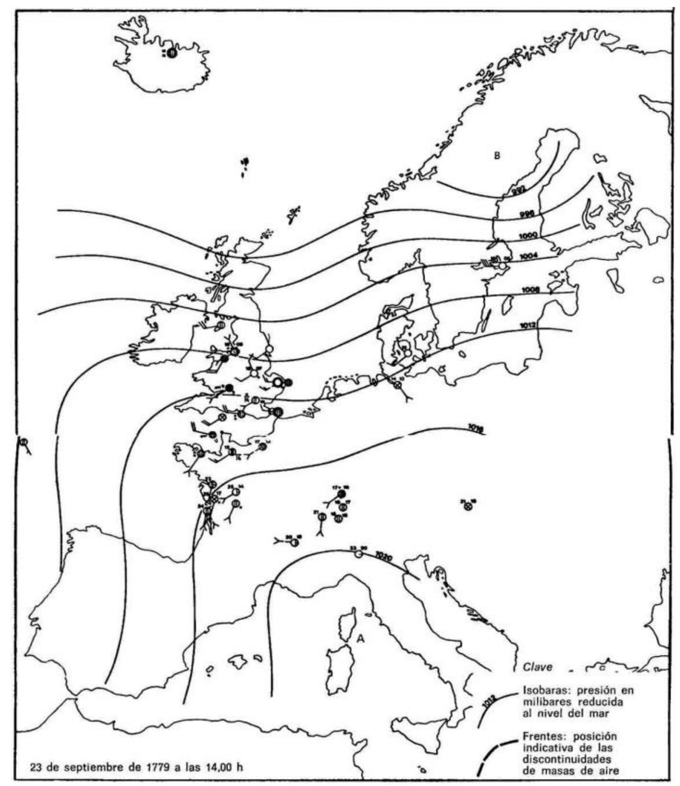


Fig. 2-5. En un intento de localizar la posición del buque hundido *Bonhomme Richard*, un equipo de Estados Unidos encargó a John Kington un estudio especial del tiempo en el mar del Norte en septiembre de 1779. El jueves 23 de septiembre, después de una mañana lluviosa, el tiempo aclaró a mediodía, volviéndose cálido y agradable. El viento fue decreciendo a brisa floja (suroeste fuerza 3), cambiando al atardecer con mar llana. Hasta ahora, el intento de descubrir el rumbo y el lugar definitivo de descanso del buque de John Paul Jones no ha tenido éxito, pero la búsqueda continúa con la ayuda de mapas como éstos, y puede alcanzar su objetivo.

Hasta ahora se dispone de mapas diarios del tiempo que cubren por completo los años 1781-86, junto con algunas cortas series de mapas especialmente elaborados para estudiar casos de sucesos climáticos o históricos de interés, tal como el tiempo en el día de la toma de la Bastilla (14 de julio de

1789), que Kington describe como un día «bueno y seco, adecuado para actividades a la intemperie» (fig. 2-4), y otra serie correspondiente a la época de la batalla naval del 23 de septiembre de 1779, en la que el *Bonhomme Richard* de John Paul Jones combatió con la fragata británica *Serapis* a la altura de Flamborough Head (fig. 2-5). Con más de 2.000 mapas sinópticos disponibles para el análisis y la interpretación estadística, el material debe ser reorganizado de una forma más manejable, y el equipo ha hecho esto clasificando los mapas por los tipos de tiempo que representan, de acuerdo con un esquema ahora normalizado debido al profesor Lamb (y descrito en el volumen 1 de su extraordinaria obra sobre el clima).

En resumidas cuentas, el esquema de clasificación de Lamb relaciona la dirección de los vientos dominantes en algún momento con la existencia de presiones altas (anticiclones) o bajas (depresiones), y establece una conexión entre éstas y las pautas de variación del vórtice circumpolar. Para Gran Bretaña, tiempo más «del oeste» implica un paso regular de depresiones y de su carga de humedad recogida en el Atlántico, y corresponde a inviernos más suaves. Esto encaja en el modelo de una intensa circulación y un vórtice circumpolar contraído. Con tiempo «menos del oeste». Gran Bretaña sufre extremos de tiempo «continental» de más larga duración, incluyendo tanto sequías estivales como inviernos rigurosos, lo que corresponde más o menos al modelo de circulación débil asociado a un vórtice circumpolar dilatado y con grandes meandros, y a una mayor frecuencia de situaciones de bloqueo. Como indican las cifras de la tabla 1, la pauta de tipos de tiempo diarios para 1781-85 muestra muy poca similitud con la de 1861 a 1969, período que ha servido para definir el «tiempo normal». El valor medio de 66 días por año de tiempo del oeste durante el período citado de cinco años es notablemente bajo comparado con el promedio de 93 días por año para el siglo que precede a 1970, promedio que se elevó a 100 días por año para el período de 1900 a 1960 Desde los años cincuenta, este índice de variabilidad meteorológica ha cambiado de nuevo, alcanzando un promedio de 80 días por

año en la década de 1960 y exactamente 66 días por año —similar a la pauta de la década de 1780— en los cuatro años anteriores a 1971. Tomando sólo un ejemplo de la masa de información. Kington señala que el período más largo de sequía en Inglaterra y Gales, anterior al extremo climático de 1975-76 mencionado en el capítulo 1, fue el de agosto de 1784 a julio de 1785. «La principal contribución de este proyecto a los asuntos de hoy día», dice, «es que está ayudando a proporcionar un cuadro más completo del comportamiento del clima durante los pasados 200 años. Esta información puede servir para la planificación nacional y económica [y] para estar mejor preparados en prever acontecimientos climáticos notables en el futuro, en una época en la que se observa una general disminución de los tipos de tiempo del oeste», esto es, en una época —la actual— en la que hay una progresiva desviación de la pauta de circulación intensa que dominó a mediados del siglo XX y un aparente retorno a las condiciones de la «pequeña glaciación» del pasado milenio.

Así pues, la perspectiva histórica de los pasados mil años descifra el rompecabezas de por qué vivimos en tiempos tan interesantes en lo que concierne al tiempo y al clima. En una escala de tiempo de siglos, la primera mitad del siglo XX, que es la que ha servido para definir las pautas del tiempo «normal», estuvo lejos de ser normal, y constituyó el período más anómalo de 50 años en los archivos climáticos del pasado milenio. La tendencia a la disminución de temperaturas y los cambios climáticos relacionados con ella desde los años cuarenta muestran claramente que el calentamiento fue una desviación temporal con respecto a la pauta de la «pequeña glaciación», no una rotura del molde, y los extremos meteorológicos de los años setenta y de principios de los ochenta son un signo de que el tiempo verdaderamente normal —el tiempo del siglo XVIII— está volviendo. Las condiciones de la «pequeña glaciación», la sequía en las altiplanicies norteamericanas y en el Sahel, las épocas de cultivo más cortas en las latitudes templadas de todo el globo, y todo lo que ello implica, son las pautas naturales que podemos esperar en las déca-

das venideras, a menos que —y hasta que— la actividad humana modifique el equilibrio meteorológico natural.

Tabla 1. Tipos de tiempo diarios en las islas Británicas, frecuencias anuales y medias de 1781 a 1785, y promedios a largo plazo, de 1861 a 1969

	O	NO	N	E	S	A	C	I	O	NO	N	E	S	A	C	I
	Número de días por año								Porcentaje							
1781	74 3/4	28	19 1/4	37 2/3	29 5/6	91	77 1/2	7	20,5	7,7	5,3	10,3	8,2	24,9	21,2	1,9
1782	75 5/6	27	31 1/3	43	24	63 1/6	90 2/3	10	20,8	7,4	8,6	11,8	6,6	17,3	24,8	2,7
1783	75 1/2	13	21 1/2	24 1/2	35 1/2	98 5/6	84 1/4	12	20,7	3,6	5,9	6,7	9,7	27,1	23,1	3,3
1784	59 2/3	27 1/2	46 1/6	42 1/2	20 1/3	106 1/2	56 1/2	7	16,3	7,5	12,6	11,6	5,5	29,1	15,4	1,9
1785	45	32 1/2	35 1/2	30 1/6	30 1/6	97 2/3	80	14	12,3	8,9	9,7	8,3	8,3	26,8	21,9	3,8
Promedio (1781-1785)	66,2	25,6	30,7	35,5	28,0	91,4	77,8	10	18,1	7,0	8,4	9,7	7,7	25,0	21,3	2,7
Promedio (1861-1969)	93	18	27	28	31	91	64	13	25,5	4,9	7,4	7,7	8,5	24,9	17,5	3,6

O = Tipo del oeste NO = Tipo del noroeste N = Tipo del norte E = Tipo del este

S = Tipo del sur A = Tipo anticiclónico C = Tipo ciclónico I = Inclasificable

Pero ¿por qué cambia el clima? Sin una idea de cómo funciona la máquina atmosférica global, y de cómo y por qué cambia de marchas, no se puede hacer otra cosa que predicciones imprecisas. Y sólo sabiendo cómo actúan los frenos y balances naturales podemos realmente comprender cómo las actividades humanas pueden estar, de hecho, desequilibrando la máquina atmosférica. Por suerte, la ciencia meteorológica ha progresado hasta el punto de ser capaz de explicar esas fluctuaciones naturales justo a tiempo para servirse de esos conocimientos como guía de las influencias antropogénicas sobre el clima. La historia comienza con la configuración cambiante de la circulación atmosférica que estructura las zonas climáticas de nuestro planeta y nos aporta el ritmo cíclico de las estaciones.

III. LA MÁQUINA ATMOSFÉRICA

La circulación general de la atmósfera —la máquina atmosférica del planeta Tierra— se pone en movimiento gracias a las desigualdades en la cantidad de calor recibido del Sol a diferentes latitudes. El cuadro se complica debido a la distinta manera en que los océanos y los continentes responden al calor solar que les llega, y a la rotación de la Tierra, que retuerce de forma complicada el conjunto de la circulación convectiva a gran escala. Los cambios climáticos, tanto si se trata de una escala de tiempo desde una glaciación hasta un período interglacial y la vuelta a aquélla, como si se trata de la cantidad de lluvia adecuada en una época de sequía en el Sahel o en las Grandes Llanuras de Norteamérica, dependen de pequeñas modificaciones en el funcionamiento normal de la máquina atmosférica: ni siquiera el equivalente de una llave inglesa que se arrojara sobre una máquina, sino más bien la mínima interrupción que podría causar, extendiendo la analogía, un grano de arena en uno de los engranajes de la máquina. Y la única manera de comprender esas diminutas fluctuaciones es teniendo, como mínimo, una idea general del funcionamiento de la máquina.

La energía solar es la clave para la comprensión del tiempo y el clima. La Tierra recibe calor del Sol y lo radia hacia el espacio. Ambos procesos se mantienen en el justo equilibrio a largo plazo, ya que de otro modo la Tierra se calentaría continuamente, si absorbiera más calor del que radia, o se iría enfriando si radiase más calor del que recibe del Sol (en realidad, un poco de calor escapa del interior de la Tierra, especialmente en una región volcánica como Islandia. Considerando la totalidad del planeta, sin embargo, esto tiene un efecto mínimo en comparación con el calor del Sol).

Los términos «energía» y «calor» son aquí intercambiables; con mayor precisión deberíamos hablar de energía elec-

tromagnética del Sol, que radia principalmente en la porción del espectro electromagnético que observamos en forma de luz visible. Esto no es una coincidencia: nuestros ojos han evolucionado y se han adaptado a lo largo de cientos de millones de años para responder con mayor sensibilidad a la clase de radiación que el Sol proporciona. De hecho, la radiación solar se extiende un poco hacia cada lado del espectro de luz visible: en el extremo de onda corta, sobrepasa las partes azul y violeta del espectro y se interna en el ultravioleta, y en el extremo de onda larga va más allá de la porción roja del espectro y penetra en el infrarrojo. La radiación infrarroja, o región infrarroja del espectro electromagnético, corresponde a la energía calorífica emitida por una superficie más fría que la del Sol, y la mayor parte de la energía radiada por la Tierra lo es en esta forma. La temperatura en la superficie del Sol alcanza casi los 6.000°C. mientras que la temperatura media de la Tierra es de unos 15°C. Esta diferencia por sí misma determina la longitud de onda en la cual va a radiar cada uno de los cuerpos la mayor parte de su energía, de modo que el equilibrio calorífico de la Tierra se establece entre la energía solar incidente, en longitudes de onda alrededor de las de luz visible, y la energía terrestre emitida en longitudes de onda del infrarrojo. La diferencia es esencial para la Tierra: sin embargo, en lo que se refiere al funcionamiento de la máquina atmosférica, el primer efecto importante es que, sobre una superficie determinada de tierra firme o de mar, en el ecuador se recibe mucho más calor que en latitudes altas. La circulación general de la atmósfera es el resultado del proceso natural que tiende a igualar esta diferencia.

La igualación, sin embargo, no se realiza sólo con energía radiante. La energía puede propagarse de un lugar a otro de tres maneras diferentes. A través del espacio vacío entre el Sol y la Tierra, se propaga en forma de energía radiante, del mismo modo que nos llega el calor de las brasas o de los leños de una hoguera. En la materia sólida, como el atizador de una chimenea, el calor se propaga por conducción, forzando a los átomos del sólido a chocar unos con otros con mayor fuerza. No obstante, ninguno de esos procesos suministra la

energía impulsora de la máquina atmosférica. La atmósfera es un conjunto de moléculas demasiado difuso para que la conducción ejerza un efecto importante en la propagación del calor alrededor del globo, y además es transparente a la radiación solar. La radiación incidente calienta la superficie de la Tierra, y el calor pasa de la superficie calentada a las capas bajas de la atmósfera en parte por conducción, pero principalmente por medio de la radiación infrarroja, que es absorbida por moléculas tales como el vapor de agua y el dióxido de carbono en la atmósfera. Una vez se han calentado las capas más bajas de la atmósfera, interviene el tercer proceso de propagación de la energía, la convección.

LA CONVECCIÓN EN FUNCIONAMIENTO

La mejor manera de resumir la convección es el viejo dicho: el aire caliente sube. Simplificando al máximo, la circulación general de la atmósfera es el resultado de que el aire caliente ascienda en los trópicos y sea obligado a moverse hacia el norte y el sur a medida que más aire caliente sube desde abajo. El aire desalojado se enfría, porque emite calor en forma de energía infrarroja hacia el espacio, y desciende en latitudes más altas, donde cede una mayor cantidad de calor a la superficie de la Tierra en regiones que no gozan del beneficio del sol tropical. Sin embargo, esta sencilla representación oculta todas las características interesantes de la máquina atmosférica que hacen el clima tan variable.

En primer lugar, existe una diferencia entre la cantidad de calor radiada por el Sol que alcanza la cima de la atmósfera (en general llamada «constante solar», aun cuando algunos astrónomos creen que la energía emitida por el Sol varía ligeramente) y la cantidad de calor que, atravesando la atmósfera, llega a cada metro cuadrado del suelo, la cual se denomina insolación. Aunque la atmósfera en sí misma es transparente a la energía solar, las nubes pueden reflejar una gran parte de la radiación solar incidente, mientras que finas partículas de polvo dispersan la luz solar en todas direcciones. Esta difu-

sión es lo que nos hace ver el cielo azul, ya que las longitudes de onda más cortas, correspondientes a la luz azul, son difundidas con facilidad y se reparten por toda la bóveda celeste. Las longitudes de onda en el rojo se difunden en menor grado, por lo que pueden penetrar directamente, incluso a través de una capa atmosférica polvorienta, hasta alcanzar el suelo: de ahí que las puestas de sol se vean rojizas. El rojo de una puesta de sol es el color que queda después de haber sido dispersadas todas las longitudes de onda más cortas.

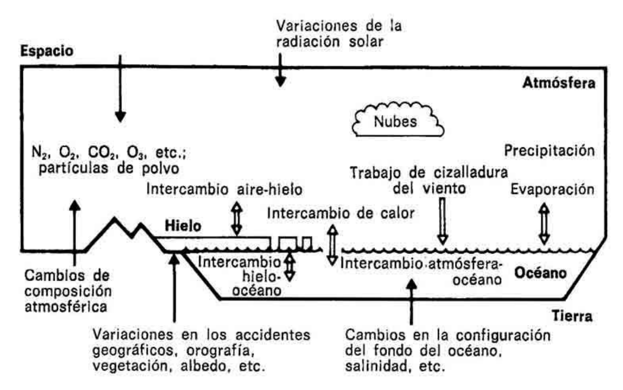


Fig. 3-1. Esta esquemática ilustración, preparada por la National Academy of Sciences de Estados Unidos, indica la complejidad de las interacciones entre tierra, mar, aire y hielo que afectan el funcionamiento de la máquina atmosférica.

Una vez que la energía ha llegado al suelo, puede ser absorbida si cae sobre una superficie oscura, tal como un denso bosque tropical, o puede ser devuelta casi por entero al espacio si cae sobre una brillante superficie reflectora, como ocurre en el casquete de hielo antártico. Y dado que la cantidad de insolación (calor por unidad de superficie) depende del ángulo del Sol sobre el horizonte, ésta varía según la hora del día, la latitud y la estación del año. Cuando el Sol está bajo en el cielo, la energía, incidente se reparte sobre una gran superficie; cuando está alto en el cielo, la energía se concentra y la insolación alcanza valores máximos. Como en los trópicos el Sol está siempre alto a mediodía, las regiones ecuatoriales

absorben más calor que las latitudes altas, y ello pone en movimiento la circulación de la máquina atmosférica. Las altas latitudes reciben gran cantidad de energía en verano, cuando su hemisferio está inclinado hacia el Sol, pero, en las regiones polares, esta circunstancia está más que compensada por la reflectividad de los campos de hielo y nieve, que son la herencia de muchos largos y fríos inviernos sin casi insolación alguna. Aun cuando el Sol esté alto en el cielo, no puede calentar demasiado las regiones polares porque gran parte de la energía es reflejada y devuelta al espacio.

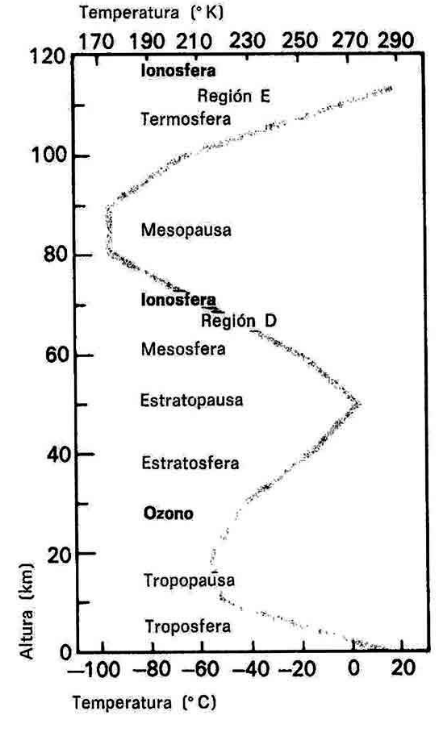


Fig. 3-2. La estructura en capas de la atmósfera de nuestro planeta se ve claramente en las variaciones de temperatura según la altura. La capa más baja, o troposfera, es la región en la que circulan los sistemas portadores del tiempo meteorológico.

Las características de la circulación atmosférica que definen el tiempo y el clima corresponden casi por completo a la capa más baja de la atmósfera, la troposfera, que se extiende desde la superficie hasta unos 15 km en el ecuador y hasta aproximadamente la mitad de esa altura en los polos. Esta es la capa más delgada de atmósfera en lo que se refiere al espesor geométrico (fig. 3-2), pero la más gruesa con respecto a la densidad del aire: el 80% de la masa atmosférica está contenido en la troposfera. Dado que la radiación solar calienta primero la superficie de la Tierra, la cual calienta a su vez el aire presente sobre ella, la troposfera registra su máxima temperatura en el suelo (o en el mar) y se enfría progresivamente a mayor altitud; la capa de atmósfera superior a la troposfera es la estratosfera, que absorbe energía directamente de la radiación solar incidente debido a reacciones fotoquímicas en las que interviene el ozono, versión triatómica del oxígeno. Como consecuencia de ello, la estratosfera es más cálida que la parte superior de la troposfera, y el antiguo dicho de que el aire caliente sube solo se aplica si el aire de encima está menos caliente. Así pues, a los efectos prácticos, la convección se detiene en la frontera entre la troposfera y la estratosfera, llamada tropopausa.

Si la Tierra no girase y tuviese una superficie lisa como una bola de billar, esta circulación sería verdaderamente muy simple. Pero, en la realidad, el modelo «ideal» de aire caliente en ascenso, que se aleja del ecuador, desciende y retorna hacia el mismo para cerrar el ciclo de convección sólo se aplica un poco hacia el norte y hacia el sur. Debido a la rotación de la Tierra, el sencillo modelo de circulación se complica rápidamente a medida que nos alejamos del ecuador. La Tierra gira sobre sí misma una vez cada 24 horas, y, como la longitud del ecuador es de unos 40.000 km. un punto de su superficie o una persona de pie sobre ella o cerca de ella se mueve de oeste a este a bastante más de 1.500 km por hora. Por supuesto, en los polos no existe movimiento alguno hacia el este, y entre estos y el ecuador los puntos de la superficie terrestre corresponden a todas las velocidades entre 0 y más de 1.500 km por hora. Cuando el aire tropical, siguiendo el

ciclo de convección, regresa a la superficie de la Tierra a alguna distancia al norte o al sur del ecuador, lo hace casi a su velocidad original hacia el este. Sin embargo, la superficie de la Tierra en la región fuera de los trópicos, donde el aire tropical desciende, se mueve hacia el este a menor velocidad. El resultado es que el aire descendente sopla de oeste a este como viento dominante en las latitudes medias. Los vientos que regresan hacia el ecuador soplan desde una región de movimiento más lento hacia el este a la región de movimiento más rápido hacia el este, y además son frenados por el rozamiento con la superficie de la Tierra. En definitiva, los vientos dominantes que soplan hacia la zona intertropical de convergencia (ZIC) tienen una componente del este, soplando desde el noreste y sureste, no directamente de norte a sur a través del ecuador (fig. 3-3).

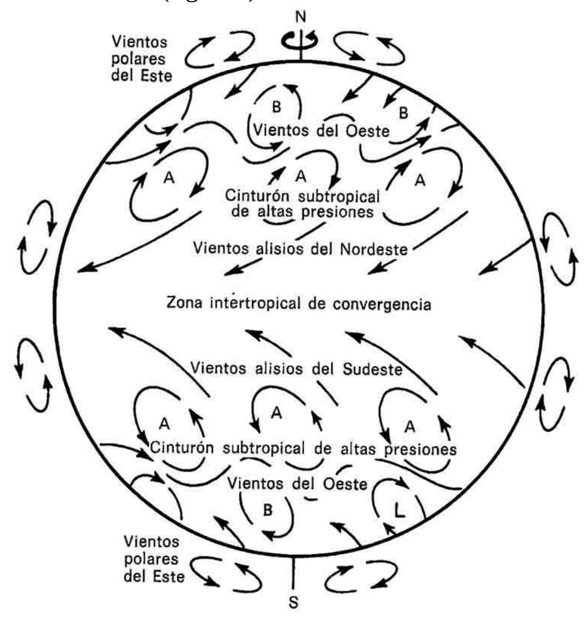


Fig. 3-3. La circulación atmosférica global, impulsada por el calor del Sol y la rotación de la Tierra, produce bandas entre paralelos dominadas por altas o bajas presiones, o por los vientos alisios. Éstas son las zonas climáticas básicas de nuestro planeta.

En el hemisferio norte, los vientos dominantes del oeste en latitudes medias rigen las características del tiempo en Europa y Norteamérica. En el hemisferio sur, los vientos equivalentes soplan alrededor del globo sobre una región casi por entero libre de tierras, y, sin ser obstruidos por grandes cadenas montañosas, resultan los «furiosos cuarenta» de los tiempos de la navegación a vela. Más allá de la región de aire descendente que se convierte en viento del oeste en cada hemisferio, parte del aire tropical continúa su viaje hacia el polo a grandes alturas, descendiendo finalmente sobre las regiones polares y enfriándose para producir los cortantes vientos del este que proceden de las regiones polares en invierno.

LAS ZONAS CLIMÁTICAS

Todos estos modelos de circulación se pueden relacionar con la distribución de sistemas de alta y baja presión alrededor del globo, así como con las regiones de alta y baja pluviosidad. Parte del calor solar —en realidad, gran parte de él— no se invierte en el calentamiento de la superficie terrestre en los trópicos, sino en la evaporación de agua. Así pues, el aire cálido que asciende en los trópicos no sólo es cálido sino también húmedo, y una consecuencia del enfriamiento del aire en ascenso es que el vapor de agua pasa de nuevo a la forma de gotículas de agua, cediendo calor al condensarse y dando lugar a las nubes que producen las lluvias tropicales. En términos generales, el aire ascendente está asociado a lluvia, y por este motivo los trópicos son húmedos y están cubiertos de exuberante vegetación. Por el contrario, donde el movimiento es principalmente descendente, el vapor de agua es absorbido por la corriente de aire a medida que ésta se calienta y comprime. El movimiento hacia abajo causa una acumulación de aire en la superficie, y aumenta la presión atmosférica; de este modo, el resultado final es que las regiones de aire descendente son secas y además están dominadas por altas presiones. Los desiertos del suroeste de Estados

Unidos, el Sahara y otras áridas regiones del globo son productos típicos de esta particularidad de la circulación atmosférica, y, aunque no se suelen considerar como desiertos, las frías y secas regiones que rodean los polos se producen exactamente de la misma manera. La región dominada por los vientos del oeste queda entre esas dos regiones de aire seco descendente. Así pues, las zonas climáticas mundiales concuerdan bien con los conocimientos que los meteorólogos tienen acerca del funcionamiento de la máquina atmosférica.

Desde unos 5° al sur del ecuador hasta 10° al norte (la diferencia es debida a la desigual distribución de tierras y mares en el planeta), el tiempo es cálido y húmedo, tiempo ecuatorial con temperaturas diurnas apenas variables a lo largo del año, agobiantes 27°C con alta humedad relativa y niveles de lluvia que en muchos lugares superan los 200 cm en un año. La combinación de calor y humedad produce exuberante vegetación y resulta ideal para los insectos, pero no es muy agradable para los hombres. Fuera de la zona ecuatorial, a unos 20 de latitud al norte y sur del ecuador, el tiempo está principalmente regido por los vientos alisios, la porción a ras de tierra de la circulación convectiva de retorno. Sin embargo, dado que la ZIC se mueve hacia el norte o el sur según las estaciones, esas regiones quedan a veces bajo la influencia de los sistemas meteorológicos ecuatoriales, con un marcado cambio de los secos inviernos, dominados por los alisios, a los sofocantes veranos ecuatoriales. Dichas regiones son los verdaderos trópicos en el sentido meteorológico, donde durante la estación seca, y con cielos despejados, la temperatura llega a alcanzar los 40°C: por la noche, en cambio, esos mismos cielos despejados permiten perder calor con tanta rapidez que las temperaturas pueden descender a menos de 15°C. El promedio de pluviosidad es de 100 a 150 cm por año, pero las regiones interiores continentales son mucho más secas que las costeras y muestran un mayor contraste entre las estaciones. Ciertas partes de la zona tropical resultan muy adecuadas para el hombre, si bien el principal problema estriba en las imprevisibles sequías que tanto dificultan la agricultura. El borde norte de Australia y América Central son ejemplos de regio-

nes tropicales con buena pluviosidad: el este de África y el Sahel son ejemplos de áreas de la misma zona climática pero con lluvias inseguras, al estar al abrigo de los vientos dominantes por el grueso del continente al oeste.

El Sahel puede también considerarse parte de otra zona climática, la región donde el modelo tropical de lluvia estacional es tan pronunciado que se le llama el monzón. Hacia el polo con respecto al cinturón de los monzones, se encuentran los grandes desiertos producidos por la influencia del aire descendente, especie de zona amortiguadora entre las regiones dominadas por las pautas de circulación asociadas al ecuador y las dominadas por la circulación alrededor de los polos, en particular por el vórtice circumpolar. Hacia el lado polar de la cálida región desierta, la primera zona en la que dominan los vientos del oeste se describe como clima mediterráneo, de manera bastante lógica pues el arquetipo de este clima es el mismo Mediterráneo, que se encuentra hacia la parte occidental de los continentes, entre las latitudes 30 y 40°; se caracteriza por una pronunciada variación estacional del tiempo, desde veranos cálidos y secos a inviernos templados y lluviosos regidos por los vientos dominantes del oeste. Aparte de las propias regiones mediterráneas. California, el suroeste de Australia y el extremo de África del Sur tienen clima mediterráneo, razón por la cual precisamente producen buenos vinos. Éste es, según mucha gente, el mejor clima para la habitabilidad humana, con temperaturas diurnas que tal vez resultan algo incómodas en pleno verano, si superan los 35°C, pero con tardes agradables y noches frescas, mientras que los días de invierno no son más duros que los de finales de primavera en un país septentrional como Gran Bretaña, y la lluvia, entre 40 y 80 cm. es suficiente para la agricultura, aunque tiende a caer en brotes repentinos. Los días lluviosos lo son realmente, pero la mayor parte de los días son buenos y secos.

Más allá de la zona de clima mediterráneo viene otra de gran interés, esto es, la zona templada entre unos 40 y 60° de latitud norte y de 35 a 55° de latitud sur. Aquí, los vientos del oeste realmente rigen el tiempo, pero «templado» es una

denominación muy poco apropiada, pues, aunque la zona incluye Europa occidental (de hecho, fueron los europeos occidentales quienes le dieron el nombre) y regiones similares como Nueva Zelanda, comprende también el corazón de continentes, tales como Siberia, la parte central y septentrional de Estados Unidos y Canadá, donde las condiciones son mucho más extremadas. Dichas regiones, lejos de ser templadas, se describen generalmente como de clima continental, mientras que las verdaderas regiones templadas son sólo aquellas que se encuentran al occidente de los continentes, regidas por la llegada de sucesivos sistemas báricos que penetran desde los océanos situados más al oeste. Los vientos dominantes sobre los océanos mantienen las regiones templadas frescas en verano y más calientes de lo que serían en invierno si ellos no existieran. Este clima es ideal para la agricultura, pero no del gusto de todo el mundo en cuanto a habitabilidad humana.

A latitudes aún más altas se hallan las regiones polares y subpolares, donde los inviernos son largos y duros. Cuanto más hacia el polo, tanto menor es la influencia compensadora del verano y tanto más rigurosos resultan los inviernos. Las nevadas y desoladas regiones de los hielos árticos, así como el helado continente antártico, son verdaderos desiertos incapaces de mantener la vida vegetal y donde los animales habitantes, tales como los pingüinos, sobreviven gracias al mar, no al continente.

CASI UNA GLACIACIÓN

Cuando hablamos de que la dilatación o contracción del vórtice circumpolar comprime las zonas climáticas hacia el ecuador o permite que éstas se extiendan hacia los polos, ello no significa que los meteorólogos crean que el vórtice controle la totalidad de la circulación. Es bastante más probable que la causa primera de las variaciones se encuentre en la zona tropical, donde la entrada de energía en la máquina atmosférica es máxima. Sin embargo, los cambios en el vórtice circumpolar, especialmente la bien definida variación de circu-

lación intensa a débil, son bastante más fáciles de detectar que las sutiles fluctuaciones en el equilibrio energético de la zona ecuatorial. Lo que realmente ocurre es que la máquina atmosférica «cambia de marcha», y la primera señal clara de esto es que la configuración zigzagueante de la corriente del oeste alrededor del polo cambia de carácter. Cuando investigamos las causas de las variaciones climáticas, sería un error fijarse demasiado en las regiones del globo dominadas por los vientos del oeste. Tiene mucho más sentido observar las variaciones en la cantidad de energía que llega al suelo —la insolación y los cambios en la cantidad que se refleja de nuevo hacia el espacio. El polo Sur recibe más insolación en un día de verano que ninguna otra región del planeta, a pesar de lo cual sigue siendo uno de los lugares más fríos de la Tierra, simplemente porque está cubierto de nieve y hielo, de modo que absorbe muy poca de la radiación solar incidente. Si la nieve y el hielo se extendieran lo suficiente hacia la zona templada, sin que variase la pauta de insolación actual, la Tierra estaría al borde de una persistente glaciación: mientras la hierba o los bosques reflejan sólo el 15% de la energía que reciben, la nieve reciente refleja más del 80%. Tal vez bastaría una sucesión de inviernos malos para inclinar la balanza climática a favor de una nueva glaciación. George Kukla, del Lamont Doherty Geological Observatory de Nueva York, ha calculado que en el riguroso invierno de 1971-72 en el hemisferio norte la cobertura de nieve y hielo aumentó en una sexta parte de la cantidad necesaria para desencadenar la «próxima» glaciación. ¿Podrían seis de tales inviernos seguidos inclinar tanto la balanza? Tal vez esto sea exagerar la delicadeza del equilibrio climático actual, pero muchos ponderados y respetables climatólogos aceptan que cien años de tiempo riguroso podrían ser suficientes para iniciar una nueva glaciación. Como veremos en el capítulo siguiente, el descubrimiento clave es que las condiciones de glaciación son normales en el mundo de hoy y que las interglaciales son raras Una infrecuente combinación de factores, hace de 18.000 a 11.000 años, fundió suficiente nieve y hielo para iniciar el presente período interglacial: desde entonces, las cosas han vuelto a la

normalidad, y vivimos en una época en la que la insolación en todo el globo es característica del modelo de glaciación. Lo que ocurre es que la nieve todavía no ha tenido oportunidad de caer en grandes cantidades: pero, cuando lo haga, la insolación será demasiado débil para eliminarla.

No obstante, mientras esperamos la próxima glaciación, las fluctuaciones climáticas en menor escala continuarán siendo tan importantes como en la década de 1970, y todavía más año tras año, con el consiguiente incremento de la población y un exiguo sistema de alimentación mundial. Una vez expuestas las ideas generales de nuestro conocimiento actual de la máquina atmosférica, ¿es realmente posible imaginar las consecuencias que puede acarrear el granito de arena introducido en los engranajes?

LOS OLVIDADOS MARES

Valdría la pena saber bastante más de lo que sabemos acerca de la influencia de un importante componente de la máquina atmosférica del que hasta ahora prácticamente hemos prescindido: el océano. Los investigadores en climatología están de acuerdo en que el océano debe de tener una función vital en el funcionamiento de la máquina atmosférica. Al fin y al cabo, la atmósfera se halla realmente en contacto con el agua, y no con la tierra, sobre el 72% de la superficie de la Tierra. La circulación de la atmósfera es impulsada por el calor, pero la cantidad de calor almacenada en una columna de aire que se extendiera desde la superficie de la Tierra hasta la frontera del espacio equivaldría sólo a la cantidad de calor presente en una columna similar de agua que se extendiera desde la superficie del mar hasta una profundidad de no más de tres metros. De hecho, el océano es el almacén inicial de la radiación solar incidente, y es él, mucho más que la tierra firme, el que desprende calor en la base de la atmósfera para poner en marcha la máquina atmosférica. Al mismo tiempo, el océano hace de amortiguador contra los cambios bruscos debido al alto valor de su calor acumulado. Al igual que los

climas templados son moderados merced a la influencia de los océanos situados al oeste, el clima de toda la Tierra es amortiguado dentro de ciertos límites por la influencia moderadora de la fuente de calor oceánica (aunque, como veremos, al menos en un punto crucial el océano puede intervenir en procesos de realimentación que exageran la intensidad de una serie de fluctuaciones climáticas). Tim Barnett, del Scripps Institute of Oceanography, en La Jolla (California), es uno de los climatólogos actuales que luchan por incorporar el funcionamiento de los océanos en un esquema satisfactorio y detallado del sistema climático global. Es una dura tarea, pero hay ya pruebas claras de que el océano no sólo influye sobre el clima por medio de su propio sistema circulatorio de grandes corrientes, tales como la del Golfo (que transporta agua caliente hacia el norte en el Atlántico occidental y lo cruza, logrando mantener templadas las islas Británicas, aun cuando éstas se encuentran a la misma latitud que Terranova). sino también a través de influencias más sutiles, por medio de las cuales «manchas» calientes y frías de agua en la superficie oceánica ayudan a establecer ciertos sistemas característicos de vientos que tal vez se extienden a todo el Pacífico Norte. Estos, a su vez, consolidan la distribución de temperaturas en la superficie del mar, produciendo una realimentación positiva que refuerza el sistema local de circulación atmosférica y su influencia sobre el funcionamiento global de la máquina atmosférica. Las «anomalías» en la temperatura de la superficie del mar, causadas por afloramiento de agua caliente o fría, constituyen una fuente adicional de calor, o bien un «sumidero» que lo consume, lo cual debe de ejercer un gran efecto sobre la atmósfera situada por encima.

Tomando un ejemplo, el clima de Norteamérica, corno hemos visto, depende mucho de la forma exacta de los meandros que constituyen el vórtice circumpolar, o corriente en chorro, de un año a otro y en un año particular. A comienzos de los años cincuenta, la configuración característica de los vientos del oeste era tal que aportaba aire relativamente caliente e inviernos templados en el norte de Estados Unidos: pero, en 1957, la configuración cambió de forma extraordina-

ria, y la trayectoria seguida por la corriente en chorro dio lugar a una serie de inviernos más rigurosos que continuaron en la década de 1960. Vista en perspectiva, esta variación particular en los meandros de la corriente circumpolar puede relacionarse con la distribución de las manchas de agua fría y caliente en el Pacífico. La pauta correspondiente a los inviernos fríos estaba ligada a aguas más frías de lo normal al norte de las islas Hawái sobre todo el océano Pacífico, y a aguas más calientes al este del océano, a lo largo de la costa occidental de Norteamérica. El efecto de esta distribución sobre la circulación atmosférica era desviar las depresiones que se mueven de oeste a este hacia el sur. sobre las frías aguas del Pacífico central, antes de hacerlas girar hacia el norte alrededor del límite de la región de agua caliente y después hacerlas virar de nuevo, directamente hacia el este a través de Norteamérica. Cuando la corriente de aire llegaba a los estados del noreste, había viajado a través de una gran región de la fría parte septentrional del continente, de modo que los inviernos en el este eran fríos.

En 1971, la distribución volvió a cambiar, es decir, las manchas calientes y frías del Pacífico permutaron sus posiciones (por supuesto, no se «permutan» realmente; pero, por razones desconocidas, la región de altas temperaturas en la superficie del océano se enfrió, y la región fría se calentó). Siguiendo la misma pauta de conducta en relación con las aguas superficiales frías y calientes, la corriente en chorro —y las depresiones bajo ella— viraron primero hacia el norte alrededor de la mancha caliente, luego hacia el sur en torno de las aguas más frías, y penetraron en California, antes de virar hacia el noreste a través del continente, transportando aire caliente del sureste y dando lugar a inviernos templados en Nueva Inglaterra.

Este es sólo un ejemplo de la influencia de las temperaturas del océano sobre el tiempo y el clima en una región del globo: pero incluso este ejemplo tiene repercusiones mucho más amplias. Dado que la corriente en chorro ha de completar un número exacto de curvas en su circuito del globo, de modo que la cabeza de la serpiente ondulada de vientos muerda

siempre su cola, una ligera variación de forma sobre el Pacífico y Norteamérica altera la totalidad de la configuración corriente abajo, hacia el este. Si la corriente en chorro se desvía hacia el noreste sobre América, por lo general tiene que desviarse entonces hacia el sureste a través del Atlántico y volver a virar después hacia el noreste, aportando aire templado del sur sobre Europa. Con una pauta de circulación débil poderosamente impulsada por la distribución de temperaturas en la superficie del Pacífico, lo normal es que una sucesión de inviernos suaves en Nueva Inglaterra vaya acompañada de una sucesión de inviernos suaves en Europa occidental.

Por supuesto, intervienen también otros factores, de modo que la correlación entre las temperaturas del Pacífico Norte y el rigor de los inviernos en Nueva York y Londres está lejos de ser perfecta. Sin embargo, se han puesto de manifiesto las pruebas sobre la realidad de tales conexiones, y la tarea que los oceanógrafos-climatólogos como Tim Barnett se han propuesto es la de encajar en su lugar cada vez más piezas del rompecabezas hasta tener un cuadro completo de la influencia de los océanos sobre el clima. Este objetivo es todavía remoto. Uno de los problemas, según Barnett, es que el actual sistema educativo no adiestra al científico para ser igual de competente en Meteorología y Oceanografía: además, mientras que la Meteorología se considera como una disciplina científica «relevante», con beneficios económicos inmediatos, la Oceanografía está clasificada como una rama más abstracta de la investigación y aporta mucho menos dinero. El avance real en la comprensión —y predicción— del clima y el tiempo tendrá lugar probablemente cuando la Oceanografía reciba la atención que merece Mientras tanto, es aún posible intentar la predicción climática y explicar las pasadas variaciones del clima, poniendo especial atención en el puñado de factores que afectan la insolación, o cantidad de radiación solar que alcanza realmente la superficie de la Tierra.

LAS INFLUENCIAS CLIMÁTICAS CLAVE

La primera posibilidad es que la cantidad de calor que llega a la parte superior de la atmósfera, la «constante solar», sea ella misma variable, independientemente de lo que le ocurra a la radiación solar en su paso a través de la atmósfera hasta el suelo. Diversos cálculos dan como guía la indicación de que una variación de un 1% en la cantidad de calor que alcanza el suelo variaría la temperatura en la superficie en aproximadamente 1°C, de modo que, a igualdad de otros factores, una variación del 1% en el brillo solar sería también equivalente a un cambio de temperatura en la superficie de 1°C. Los astrónomos han considerado tradicionalmente el Sol como una estrella estable, invariable; pero en plena era espacial puede ser una sorpresa descubrir que no hay pruebas directas de que la constante solar sea realmente constante dentro de un error de 1 a 2%. Por lo que se refiere a las medidas actuales de la energía emitida por el Sol, es posible que en la escala de tiempo apropiada, de decenios y siglos, se hayan producido variaciones lo suficientemente grandes como para explicar la «pequeña glaciación» y el precedente «pequeño óptimo». Es también posible y, según muchos expertos, bastante más probable, que la cantidad total de energía emitida por el Sol sea constante, pero que la naturaleza de la radiación varíe de una época a otra. Si se produjera un poco más de la energía radiante del Sol en la región ultravioleta del espectro y un poco menos en la visible, la influencia de la capa de ozono en la estratosfera sería igualmente más intensa, ya que la radiación ultravioleta es la que se absorbe en esta región de la atmósfera. Podría producirse el mismo tipo de efecto aunque la energía radiante del Sol no variase en cantidad ni en calidad, si otras influencias provocaran un cambio en la concentración de ozono en la estratosfera. Más ozono significaría más energía solar ultravioleta absorbida, con lo que llegaría menos para calentar el suelo; menos ozono en la estratosfera permitiría un calentamiento global muy modesto en la superficie.

A un nivel inferior en la atmósfera, en la troposfera, el propio tiempo puede estar relacionado con los ciclos de realimentación que alteran el equilibrio climático. Cuanto mayor sea el número de nubes blancas y brillantes en la atmósfera, una fracción más elevada de la radiación solar incidente será devuelta al espacio sin ni siquiera alcanzar el suelo. Una de las teorías de las glaciaciones, ya pasada de moda, llevó esta idea al extremo argumentando que las glaciaciones, se produjeron cuando, por alguna razón, el Sol se hizo más caliente de lo normal. La idea se basaba en que el primer efecto de un aumento en la constante solar sería la evaporación de agua de los océanos, que daría lugar a una extensa cobertura nubosa alrededor del globo, la cual reflejaría la radiación solar incidente. Bajo los bancos de nubes, la Tierra se enfriaría notablemente, y el agua de las nubes caería en forma de nieve. Cuando las nubes se dispersaran, la superficie de la Tierra estaría cubierta de un manto blanco de nieve y hielo que reflejaría el calor solar, con lo cual habría comenzado una nueva glaciación. Esta curiosa teoría pasó de moda porque ahora tenemos mejores explicaciones del flujo y reflujo de los hielos, y porque en cualquier caso es bastante artificial.

No obstante, los climatólogos admiten que sus modelos del clima cambiante obtenidos con computador no tienen suficientemente en cuenta las variaciones en la cobertura nubosa, y que el equilibrio entre nubes y radiación es todavía un tema que requiere mucha más investigación.

Otro factor capaz de influir en el clima es el polvo atmosférico El profesor Bryson afirma que el polvo procedente de la actividad humana puede impedir el paso de una fracción tan grande de la radiación solar que nos está precipitando en una nueva glaciación. En su origen, la idea parte de la prueba histórica de que las grandes erupciones volcánicas, como la del Tambora en 1815, van seguidas de un descenso de la temperatura global de varios años de duración. Se cree que el efecto es debido al polvo volcánico que penetra en la estratosfera y se extiende formando un tenue velo que refleja parte de la radiación solar incidente La erupción de Mount St. Helens influyó muy poco sobre la temperatura global porque la ex-

plosión que reventó el volcán tuvo lugar hacia un lado, arrojando polvo sobre una amplia región, pero no directamente hacia la estratosfera. Sin duda, otros volcanes han influido sobre el clima, y Bryson cree que el «volcán humano» —polvo levantado por el viento en tierras baldías, chimeneas de fábricas, etc.— ejerce ahora una mayor influencia que cualquier volcán natural sobre la marcha actual del clima. El debate continúa con pleno vigor, ya que la influencia de esta clase de partículas microscópicas de polvo sobre el clima podría existir en un sentido u otro. La cuestión es si el polvo «gris» cubre tierras «negras» de labrantío, en cuyo caso reflejará energía que de otro modo sería absorbida, como Bryson cree, o bien si la capa gris de polvo se halla por encima de una superficie más reflectora, como campos nevados, en cuyo caso, al absorber parte de la energía solar y de la energía reflejada por la brillante superficie del suelo situado por debajo, ayuda a calentar la atmósfera. La mayor parte de los climatólogos consideran que el volcán humano influye muy poco en las temperaturas globales actuales. Esto no significa que tengan razón; pero es cierto que Bryson está casi solo en su predicción, más extrema, de un inminente retorno a la glaciación estimulado antropogénicamente.

Dentro de la troposfera, por supuesto, el hombre está sin duda alterando el equilibrio natural al causar un aumento en la concentración de dióxido de carbono. En general se opina que constituye un problema real que puede llevar a un notable calentamiento del globo por «efecto invernadero» dentro de los próximos veinte años, y éste es el tema de la Parte II del presente libro. En la superficie de la Tierra, el hombre provoca otros cambios, menos pregonados que el efecto invernadero, que tienden a ejercer una influencia opuesta sobre el clima. La deforestación de oscuros bosques tropicales con objeto de roturar la tierra —la cual puede después convertirse en un terreno erosionadle sin la protección de los árboles que mantienen el ecosistema— produce un aumento en la reflectividad de la superficie (su albedo), cuyo resultado es un incremento del calor solar que vuelve al espacio. Esto puede constituir un importante problema para la siguiente genera-

ción humana; en la misma escala de tiempo podrían tener lugar variaciones igualmente espectaculares en el albedo del Ártico si los planes soviéticos para desviar hacia el sur los grandes ríos Ob y Yenisei se ponen en marcha. Los climatólogos temen que, al desproveer a los mares Barents y Kara de estas importantes fuentes de agua dulce para irrigar los desiertos de Kazakstán y Turkmenistán, 3.000 km al sur, se podría producir una extensa fusión de los hielos del Ártico, con consecuencias imprevisibles para las condiciones meteorológicas mundiales, en especial en la región dominada por el cinturón de vientos del oeste del vórtice circumpolar.

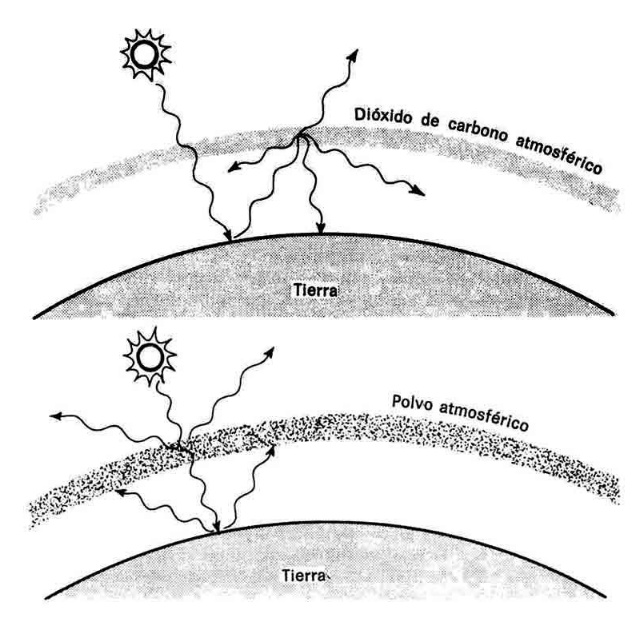


Fig. 3-4. Algunos investigadores sostienen que el polvo «cumulado en la atmósfera por actividades humanas impide el paso de la radiación solar y hace que la Tierra se enfríe. Otros opinan que la concentración de dióxido de carbono antropogónico aprisiona calor que de otro modo se perdería en el espacio y hace que la Tierra se caliente.

Knut Aagaard y L. K. Coachman, de la University of Washington, han esbozado un inquietante guión de las posibles

consecuencias de la reducción de flujo de agua dulce en los mares septentrionales. Como el agua salada es más densa que la dulce, el agua de los ríos forma una capa sobre las saladas aguas del Ártico, y dado que el agua a varios cientos de metros de profundidad es mucho más salada que el agua de encima puede estar varios grados más caliente que las capas superiores sin que la convección actúe para elevarla a la superficie. Su mayor densidad debido a la salinidad la mantiene en su lugar en contra de la natural tendencia del agua caliente a elevarse. De esta manera, el agua más caliente permanece en las profundidades y las capas superficiales de agua, más dulces y frías, forman una capa de hielo en la superficie del Ártico.

El Ob y el Yenisei son ríos muy grandes. El Ob proporciona un promedio de 400 km^3 de agua cada año, y el Yenisei 550 km^3, lo que puede compararse con el caudal del mayor río de la Tierra, el Amazonas, que es de 4.800 km^3 por año. Juntos, ambos ríos llegan a aportar un caudal de casi una quinta parte del Amazonas. Si se detuviera todo este caudal (afortunadamente. los ingenieros soviéticos todavía no planean ir tan lejos), una región de mar de un millón de kilómetros cuadrados —tan grande como Pakistán, Egipto o Francia y España unidas— quedaría libre de hielos a medida que las aguas más cálidas, que ya no estarían cubiertas por una fría capa de agua dulce, ascendieran a la superficie. Esto ciertamente desbarataría el actual equilibrio climático y alteraría el cinturón de vientos del oeste. Podría incluso (esto es sólo una suposición) desencadenar un proceso de realimentación, mediante el cual la región libre de hielos absorbería calor del Sol y se calentaría todavía más, fundiendo el hielo de sus alrededores cada vez más hasta que la totalidad del Ártico quedara libre de hielos. Por el momento, los planes soviéticos consisten en una reducción de un 5% del caudal de agua dulce que llega al océano Ártico para las primeras décadas del siglo XXI. Esto es comparable más o menos al intervalo de fluctuaciones naturales del caudal aportado por el río de un año a otro, y no debería de representar una desviación demasiado radical con respecto al actual equilibrio climático. Tales es-

quemas no están ciertamente en la misma categoría que el efecto invernadero en cuanto a amenazas potenciales para la estabilidad climática, pero sí sirven como recordatorio de que el hombre actual es capaz de alterar notablemente el medio ambiente en nuestro planeta. ¿Tienen derecho los países a llevar a cabo proyectos, incluso dentro de su propio territorio, que puedan provocar repercusiones climáticas mundiales? El climatólogo soviético E. K. Fedorov, del Comité estatal de la URSS para Hidrometeorología y Control del medio ambiente natural, comentó en la Conferencia mundial del clima en 1979 que «si se hiciera desaparecer la capa de hielo del Ártico, las circulaciones atmosférica y oceánica se reajustarían de tal manera que aquélla no podría restablecerse». Esto, según él, «llevaría a considerables cambios de clima en todo el mundo... es razonable suponer que ciertas acciones específicas, realizadas una sola vez, podrían producir cambios irreversibles».

En algunos aspectos, tales cambios podrían parecer favorables. ¿Sería realmente tan malo que el Ártico quedase libre de hielos? Tal vez no, especialmente para la URSS, Canadá y Noruega. Sin embargo, los actuales sistemas agrícolas del mundo están finamente ajustados por la moderna tecnología para sacar el máximo provecho de las condiciones climáticas existentes. Al adecuar nuestros cultivos y nuestras técnicas agrícolas a una pauta particular del tiempo, garantizamos que cuando todo va bien las cosechas son realmente muy abundantes, pero *cualquier* desviación respecto a lo que ahora son condiciones óptimas tiene como resultado un dramático descenso en la cantidad de alimentos disponibles en los mercados mundiales. Esto es una atadura en la que nosotros mismos nos hemos encerrado con los éxitos agrícolas de los años sesenta y la revolución verde. Con cualquier otro tiempo distinto del de aquella década, el sistema mundial de alimentación tiene dificultades, tanto si el cambio tiende hacia el enfriamiento o el calentamiento, hacia una circulación más intensa o más débil, o hacia una contracción o una dilatación del vórtice circumpolar.

Hay todavía otros procesos naturales que afectan el clima en una escala de tiempo importante para la humanidad. Un punto enigmático es que, aunque a lo largo de los pasados mil años o más China y Japón han tenido la misma pauta de condiciones de «pequeño óptimo» y «pequeña glaciación» que se han dado en Europa y América, aquéllos parece que la han experimentado antes. Los registros chinos se remontan a la fundación de la dinastía Chou, en el año 1066 a.C., y hay datos muy precisos de tiempo riguroso, heladas de ríos, grandes sequías, etc., desde el año 200 a.C. En Japón, nos ha llegado un curioso indicador climático en forma de registro de las fechas de florecimiento de los cerezos en primavera, suceso de gran importancia en aquella cultura. Los archivos chinos y japoneses, juntos, cuentan la misma historia, lo que resulta una tranquilizadora confirmación de que nuestras modernas interpretaciones de los antiguos registros son correctas. Hubo un largo período de frío en Oriente que duró desde el siglo X hasta el XIV, y el tiempo más riguroso, el más frío que se conoce en la región, tuvo lugar hacia el siglo XII. ¿Puede esto relacionarse con la «pequeña glaciación» de Europa, la cual se estableció bastante más tarde y persistió hasta el siglo XIX?

La respuesta parece que es afirmativa. La «pequeña glaciación» no llegó a toda Europa en la misma época. En la Rusia europea, el frío comenzó a manifestarse hacia 1350; en Europa central el tiempo empezó a mediados del siglo XV, y en Gran Bretaña aún habían de pasar cien años antes que el Támesis se empezara a helar regularmente. Es al menos posible que el período más frío de los tiempos históricos se desplazase de este a oeste a través de Asia y Europa. Resulta sencillo explicar esto en función de una deriva de la configuración ondulada del vórtice circumpolar, unida a la dilatación del vórtice que hizo empeorar las condiciones sobre la totalidad del hemisferio. Pero ¿por qué el vórtice derivaría hacia el oeste de este modo? Una posibilidad es que ello esté asociado a la conocida deriva hacia el oeste del campo magnético de la Tierra, es decir que, de alguna manera, la circulación mantenga una débil relación con la configuración del campo magné-

tico. Joseph King, del Appleton Laboratory, ha señalado que el campo magnético terrestre, en lugar de tener un único polo norte magnético, tiene en realidad un polo doble, que provoca una distorsión del campo en forma de lomo de camello en las regiones polares. El vórtice circumpolar no sólo gira limpiamente alrededor del polo Norte geográfico, sino que serpentea también en torno de un doble centro de alta presión en las regiones polares. El doble centro de la circulación se encuentra exactamente sobre el doble centro del campo magnético. ¿Es esto una mera coincidencia? King cree que no, y ha acuñado el nombre de magnetometeorología para la nueva ciencia de la predicción magnética del tiempo. Otros especialistas se muestran más escépticos y consideran que puede tratarse de una coincidencia. Lamb, sin embargo, reconoce que ciertas evidencias climáticas diferentes se combinan mostrando que «alguna perturbación que afecta la temperatura predominante en invierno progresa de forma continua hacia el oeste en el hemisferio norte, de modo que completa un circuito en unos 600 años» (Vol. 2. pág. 485) y atribuye a King el mérito de haber sido la primera persona en sugerir la existencia de la deriva hacia el oeste del vórtice circumpolar y la posibilidad de que esté relacionada con la deriva hacia el oeste del campo magnético. Desde mediados de los años setenta, como veremos en el capítulo 7, las indicaciones de una relación entre el magnetismo y el clima se han reforzado considerablemente.

El problema es que ninguna de todas esas influencias sobre el clima puede por sí sola explicar las desviaciones y retornos de los cambios climáticos en los tiempos históricos. El mundo real es más complicado que todo eso, y parece que lo que tenemos que descifrar es la compleja interacción del polvo de los volcanes, las variaciones del campo magnético, los cambios en la capa de ozono, tal vez incluso las fluctuaciones en el mismo Sol, y las en gran parte desconocidas (y hasta ahora incognoscibles) variables influencias del océano. Hacer una predicción del tiempo futuro y después modificar esa predicción a la vista del creciente aumento de concentración del dióxido de carbono en la atmósfera como consecuencia de la actividad humana es, francamente, más un arte que

una ciencia No obstante, parece que se han identificado los principales componentes del rompecabezas, que se describirán con detalle en los próximos capítulos. De todos modos, antes puede ser alentador tratar de un aspecto del cambio climático que es bien conocido y que puede emplearse para hacer predicciones con confianza y seguridad, aun cuando la escala de tiempo de la predicción resulte demasiado amplia para los efectos prácticos. Irónicamente, en vista del acalorado debate sobre la estabilidad del clima que tuvo lugar hace poco más de cien años, sabemos hoy más acerca de los ritmos de las glaciaciones y de los periodos interglaciales que sobre la manera en que cambiará el tiempo en los próximos cien años, y podemos predecir la llegada del próximo periodo glacial con cierta precisión.

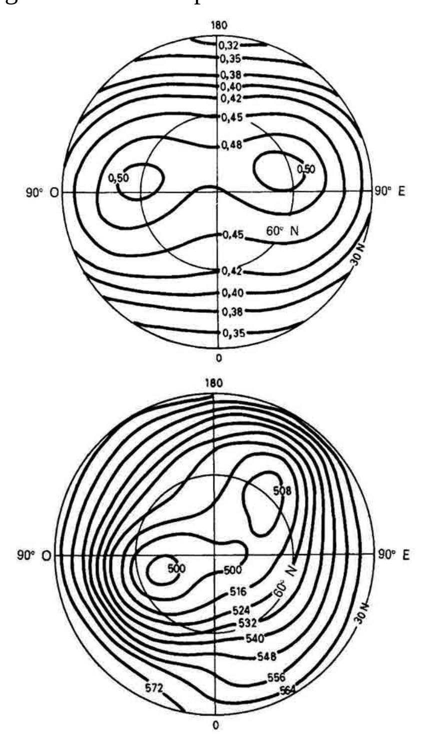


Fig. 3-5. La forma bilobular de las líneas de intensidad del campo magnético terrestre (representadas en la figura superior para 1965) muestra una sorprendente semejanza con las isolíneas del campo de presión atmosférica alrededor del polo Norte (representadas en la figura inferior en forma de altitud geopotencial de la superficie isobárica de 500 mbar). ¿Es esto una coincidencia?

IV. LA PRÓXIMA GLACIACIÓN

Cada año, las regiones templadas del globo experimentan el comienzo de una nueva glaciación. Lo llamamos invierno. El hecho de que pequeñas variaciones en la distribución del calor solar que llega a la Tierra sean capaces de producir cambios tan espectaculares a altas latitudes como la diferencia entre verano e invierno muestra lo delicado que es el equilibrio climático al borde de una glaciación, dada la distribución de continentes característica de la geografía de la Tierra durante los tres últimos millones de años. Ésta es una importante condición previa, pues los geofísicos pueden ahora afirmar que la actual geografía del globo es una fase transitoria, una distribución temporal de continentes que se hallan en perpetuo movimiento alrededor de la superficie de nuestro planeta, separándose, chocando para formar nuevos continentes, volviendo a separarse y uniéndose de nuevo, en un majestuoso calidoscopio de cambios geográficos que ha venido actuando por lo menos durante los últimos mil millones de años y sin duda desde mucho antes, si bien inevitablemente los datos geológicos son más vagos cuanto más lejano es el tiempo que tratamos de examinar.

Durante la mayor parte de la historia de la Tierra, y ciertamente durante los pasados mil millones de años, las condiciones climáticas fueron muy distintas de las actuales porque la geografía era muy diferente. «Normalmente» no hay masas de tierra próximas a los polos de nuestro planeta, y las grandes corrientes oceánicas pueden circular libremente hasta las altas latitudes, transportando agua ecuatorial caliente hacia los polos y asegurando que todas las regiones de la Tierra, excepto las cumbres de las cadenas montañosas más importantes, estén libres de nieve y hielo. Estas condiciones normales son las que existían cuando señoreaban la Tierra los dinosaurios y

florecían las grandes selvas tropicales que formaron los actuales depósitos de carbón.

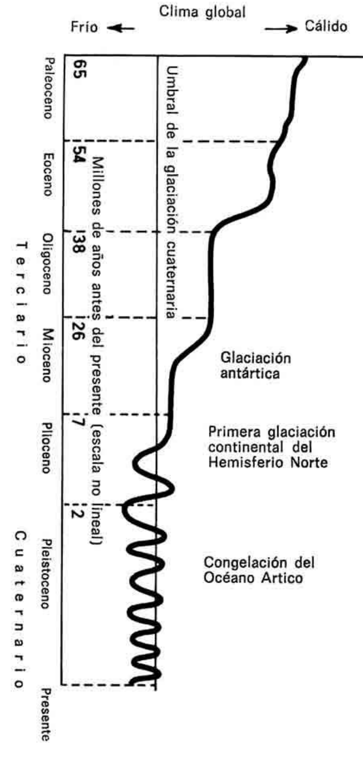


Fig. 4-1 A, esquemática. A lo largo de 65 millones de años, desde los tiempos de los dinosaurios, la Tierra ha estado inmersa en una época glacial, en la que se han producido fluctuaciones más o menos regulares —las glaciaciones— durante unos tres millones de años. (Basada en datos de J. Andrews, en *Winters of the World*, editado por b. S. John, London, David & Charles, 1979.) Obsérvese la escala a trazos, que muestra en detalle los sucesos más recientes.

Sin embargo, cada doscientos millones de años aproximadamente, la deriva de los continentes lleva una masa de tierra sobre uno u otro de los polos. Las aguas cálidas no pueden ya penetrar en las latitudes más altas, y durante los fríos inverna-

les cae la nieve y se deposita sobre las tierras. En verano, los campos nevados reflejan la radiación solar y se resisten a fundirse; en breve, se han formado gruesas capas de hielo y ha llegado una nueva época glacial. Dicha época puede durar unos pocos millones de años o incluso diez millones de años o más, según el tiempo que el continente polar tarde en derivar y alejarse del polo, permitiendo así que retornen las aguas cálidas. Durante la época glacial, habrá períodos en que el frío sea más intenso, y otros en los que éste se suavice ligeramente, pero los glaciares nunca desaparecen del todo. La Antártida se encuentra ahora a mediados de una época glacial, que comenzó hace de 7 a 25 millones de años.

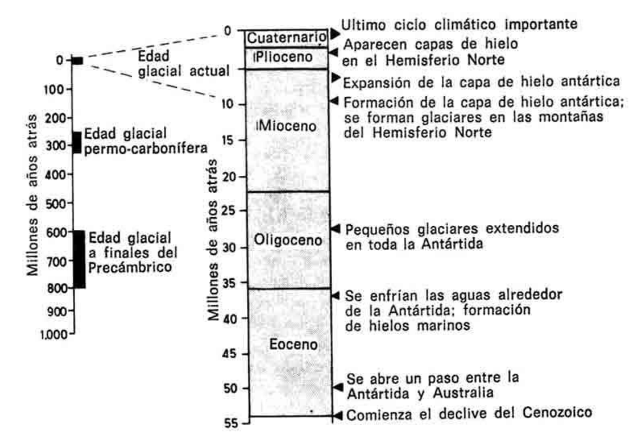


Fig. 4-1B. Las recientes fluctuaciones del clima detalladas en la figura 4-1A (a la izquierda) se pueden ver en su contexto geológico a largo plazo en este diagrama que cubre mil millones de años de la historia de la Tierra. Las épocas glaciales como la nuestra retornan cada pocos cientos de millones de años, a medida que los continentes cambian de posición alrededor del globo.

Hay otra manera de congelar las regiones polares. En lugar de ser un continente el que se sitúe de Heno sobre el polo, puede ocurrir que varios continentes se agrupen alrededor de un mar polar central, impidiendo el paso de las corrientes cálidas del ecuador, de modo que se forma una película de hielo sobre las frías aguas polares. La característica única de la época actual en la historia de la Tierra es que este tipo de

casquete de hielos polares (que refleja el calor solar y, por tanto, permite la acumulación de hielo en las tierras próximas) existe en el hemisferio norte, al mismo tiempo que el otro tipo de casquete de hielos polares, más corriente, existe en el hemisferio sur. No tan sólo vivimos en una época glacial, sino en una doble época glacial. El mundo empezó a enfriarse hace unos 65 millones de años, poco después de la desaparición de los dinosaurios, pero la presente época glacial sólo se estableció hace unos tres millones de años cuando, varios millones de años después que la Antártida quedase cubierta de hielo por primera vez, los actuales continentes septentrionales se colocaron en su presente posición, protegiendo el océano Antártico de las corrientes cálidas ecuatoriales. Aunque esta historia sea fascinante, es únicamente el telón de fondo de la historia del ritmo de las glaciaciones durante la época glacial. A todos los efectos prácticos, en términos humanos podemos considerar la geografía del planeta como fija, y la época glacial como una característica permanente en cualquier escala de tiempo que nos interese. ¿Por qué, entonces, no está hoy la Tierra en la plenitud de una glaciación? ¿Por qué, incluso, existen períodos interglaciales durante los cuales los casquetes de hielo se retiran a sus fortalezas polares y las regiones templadas se vuelven templadas? En un sentido real, el ritmo cíclico de glaciaciones y períodos interglaciales es semejante al ritmo periódico de verano e invierno; y para comprender las causas astronómicas del ciclo de glaciaciones, puede ser útil comprender las causas astronómicas del ciclo estacional.

RITMOS ESTACIONALES

La órbita de la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino elíptica. Una elipse tiene dos focos, y no un centro, y el Sol se encuentra en uno de los focos de la elipse, mientras que el otro está vacío. Durante su órbita —en el transcurso de cada año— la Tierra se halla algunas veces más próxima al Sol, y otras más alejada de él; actualmente, la máxima aproximación tiene lugar el 3 de enero. Éste es el momento del perihelio,

cuando la distancia de la Tierra al Sol es de unos 147 millones de kilómetros; el 4 de julio, al otro lado de su órbita, la Tierra está en el afelio, a unos 152 millones de kilómetros del Sol. Estos cambios son importantes, pero pequeños comparados con la distancia media de la Tierra al Sol sobre toda la órbita, de aproximadamente 150 millones de kilómetros, y no explican el ritmo de las estaciones, como lo demuestra el hecho de que el invierno del hemisferio norte se produzca precisamente cuando la Tierra está más próxima al Sol. De hecho, los inviernos septentrionales son un poco menos fríos de lo que serían si se produjeran al otro lado de la órbita terrestre, en el afelio (y, evidentemente, los inviernos del hemisferio sur deberían de ser más fríos que ahora), pero estos cambios están a un nivel menos importante que las variaciones que trae consigo la marcha de las estaciones. La verdadera causa de los ritmos estacionales estriba en que la Tierra está inclinada con respecto a una línea imaginaria que une el centro del planeta con el del Sol.

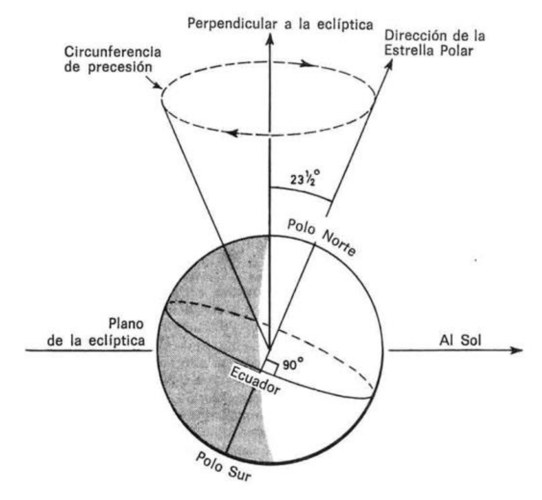


Fig. 4-2. La Tierra está inclinada unos 23,5° con respecto a la perpendicular a la línea que une la Tierra y el Sol. Las variaciones de este ángulo de inclinación y la forma en que la Tierra se «bambolea», o sufre precesión, a lo largo de miles de años, explican muchas características del cambio climático durante la presente época glaciar.

Esta inclinación alcanza 23,5°, es decir, una línea igualmente imaginaria que uniese los polos Norte y Sur de nuestro planeta formaría un ángulo con la línea que uniese la Tierra y el Sol de 23,5° *menos* que el ángulo recto (de 90°). Cuando la Tierra sigue su órbita alrededor del Sol, la dirección de esta inclinación en el espacio —con respecto a estrellas distantes— permanece casi constante de año en año (fig. 4-3). El resultado es que, durante una parte del año, el hemisferio norte se inclina hacia el Sol, mientras que durante la otra parte se aleja de él. Desde la superficie de la Tierra, el Sol se va más alto en el cielo en el hemisferio de verano, mientras que el polo de verano recibe luz durante 24 horas en el solsticio, y el polo opuesto (el de invierno) tiene noches de la misma duración.

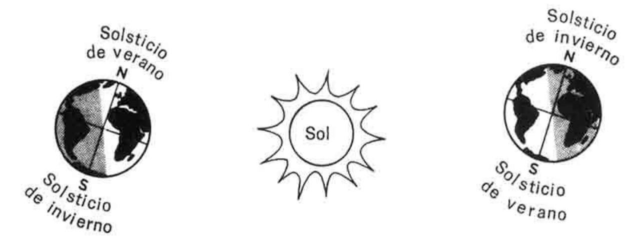


Fig. 4-3. La inclinación actual de la Tierra causa las variaciones rítmicas del clima a lo largo del año, lo que nosotros interpretamos como la marcha de las estaciones.

Cuando las horas de luz representan una mayor fracción de las 24 horas del día, en verano, hay evidentemente más calor solar disponible en la superficie de la Tierra. Al mismo tiempo, como el Sol está más alto en el cielo, sus rayos caen más próximos a la vertical, concentrando el calor sobre un área de la superficie terrestre menor que cuando el Sol se halla bajo en el horizonte. Al igual que los trópicos son, por esta razón, más cálidos que la zona templada de la Tierra, así el verano en la zona templada —y en los polos— se beneficia de este aumento de la insolación. En definitiva, las estaciones se definen en términos de la orientación del eje de la Tierra con respecto al Sol. Cuando el hemisferio norte está inclinado directamente hacia el Sol, lo que ocurre el día 21 de junio,

tiene lugar el solsticio de verano en el norte y el solsticio de invierno en el sur; en el punto opuesto de la órbita terrestre, el 21 de diciembre, se da el solsticio de invierno en el hemisferio norte y el de verano en el hemisferio sur. Exactamente a medio camino entre esos dos puntos de la órbita terrestre, tenemos dos fechas en las que tanto el día como la noche duran 12 horas; estas fechas se denominan (para un observador en el hemisferio norte) equinoccio de primavera (20 de marzo) y (fig. 4-4) equinoccio de otoño (22 de septiembre). El invierno va del 21 de diciembre al 20 de marzo: la primavera, del 20 de marzo al 21 de junio; el verano, del 21 de junio al 22 de septiembre, y el otoño, del 22 de septiembre al 21 de diciembre. Al menos, esto es así desde el punto de vista astronómico; tales fechas se han determinado a partir de la geometría de la órbita terrestre, y no tienen mucho que ver con el comportamiento de plantas o animales, ni con el frío o el calor que usted pueda sentir. Para quienes no son astrónomos, es más sensato, en la mayor parte del hemisferio norte, definir los meses de invierno como diciembre, enero, febrero y marzo, con una primavera de dos meses (abril y mayo), un verano de cuatro (junio a septiembre) y un otoño de dos (octubre y noviembre).

El máximo de calor en verano y el mínimo de frío en invierno se retrasan con respecto a la posición del Sol en el cielo, vista desde la Tierra, a causa del tiempo que ésta tarda en responder a las variaciones en la cantidad de insolación. En el hemisferio norte, el 22 de junio no es el día más cálido del año, aun cuando sea el que tiene más horas de luz, porque, durante las semanas próximas a esa fecha, una gran parte del calor solar recibido sirve para sacar al hemisferio de su helado estado invernal. En el otoño, este ex ceso de calor se disipa sólo lentamente a medida que el Sol asciende menos en el cielo cada día a mediodía, de modo que el día más corto, el 22 de diciembre, no es de ningún modo el más frío, y la sucesión de estaciones en el suelo se retrasa sistemáticamente respecto a la sucesión de estaciones astronómicas.



Fig. 4-4. En el curso de un año (una órbita alrededor del Sol), la distancia de la Tierra al Sol también varía. El perihelio es el punto de máxima aproximación al Sol; el afelio es el punto de la órbita donde nos hallamos más lejos del Sol. En el solsticio de verano, el polo Norte está inclinado hacia el Sol, mientras que en el de invierno lo está hacia el lado opuesto. Es una mera coincidencia que en nuestra época el solsticio de verano casi coincida con el afelio, (basado en la figura 14 de *Ice Ages: Solving the Mystery*, de John Imbrie y Katherine Palmer Imbrie.

Es precisamente una coincidencia que el solsticio de verano tenga lugar en nuestro tiempo tan próximo al afelio, pues, aun cuando las fechas de los solsticios son prácticamente constantes en el curso de una vida humana, la orientación del eje de la Tierra con respecto a las distantes estrellas sí varía ligeramente a lo largo de milenios. Como consecuencia de la atracción gravitatoria del Sol y la Luna sobre el ligero abombamiento ecuatorial de la Tierra, el planeta se bambolea lenta y graciosamente al igual que un peón de juguete en rotación. El resultado es que el polo Norte no «apunta» siempre en la misma dirección, sino que se desplaza trazando una circunferencia en el espacio, de modo que la línea imaginaria que une los polos Norte y Sur describe un cono con un ángulo de dos veces 23,5°. Este majestuoso bamboleo tarda 26.000 años en completar un circuito, y, como resultado, la configuración completa de solsticios de verano e invierno y de equi-

noccios de primavera y otoño se mueve a lo largo de la órbita elíptica de la Tierra. Esto, denominado precesión de los equinoccios {se podría llamar asimismo precesión de los solsticios), proporcionó la base de la primera (aunque incorrecta) teoría del ritmo de las glaciaciones en los pasados millones de años.

EL RITMO DE LAS GLACIACIONES

Johannes Kepler, el astrónomo del siglo XVII que fue el primero en darse cuenta de que las órbitas de los planetas son realmente elipses y no circunferencias, descubrió también que cada planeta describe su órbita a velocidad variable, mayor cuando se está moviendo cerca de la parte de la órbita más próxima al Sol (perihelio) y menor en el extremo de su órbita más lejano del Sol (afelio). Los detalles de la velocidad variable no son aquí importantes, aunque proporcionaron una de las bases sobre las que Isaac Newton desarrolló su teoría de la gravitación universal. Lo que nos interesa realmente es saber que, en el presente, la mitad de la órbita terrestre centrada alrededor del solsticio de verano (primavera y verano del hemisferio norte) es recorrida con mayor lentitud que la mitad de la órbita correspondiente a otoño e invierno. Primavera y verano contienen en total siete días más que otoño e invierno, en cambio, en el hemisferio sur las estaciones frías, juntas, tienen siete días más que las estaciones cálidas unidas. En 1842, el matemático francés Joseph Adhémar sugirió que ésta podría ser la razón por la que la Antártida se encuentra hoy aprisionada por los hielos, en tanto que el hemisferio norte disfruta de las condiciones relativamente templadas que llamamos de período interglacial.

Como consecuencia de otros y más sutiles cambios en la geometría de la órbita de la Tierra alrededor del Sol (a los cuales nos referiremos en breve), el ciclo sobre el que se repite la precesión de los equinoccios no es ahora de 26.000 años, sino de 22.000. Así pues, según la idea de Adhémar, hace 11.000 años, cuando se invirtió el patrón de los veranos

y los inviernos, el hemisferio norte debió de haber estado en plena glaciación, mientras que, probablemente, la Antártida tenía bastante menos hielo que hoy. Esta teoría encajaba muy bien en el limitado conocimiento que los geólogos de mediados del siglo XIV tenían acerca de las pasadas glaciaciones, y concordaba sobre todo con la creciente cantidad de evidencias de que el hemisferio norte había sufrido realmente una sucesión de glaciaciones separadas por períodos interglaciales. Por lo que cualquiera sabía en 1842, había habido una glaciación en Europa y Norteamérica hacía 11.000 años, con un período interglacial previo hacía 22.000 años, una glaciación anterior hacía 33.000 años, y así sucesivamente hasta perderse en la bruma del pasado. Sin embargo, diez años más tarde, en 1852. Alexander von Humboldt, científico alemán famoso por la corriente oceánica que lleva su nombre, señaló el fallo garrafal en el razonamiento de Adhémar. Aunque la mitad de verano del hemisferio norte de la órbita terrestre es siete días más larga que la mitad de invierno, ello sucede porque la Tierra se halla más lejos del Sol durante la mitad de verano de la órbita, y por tanto recibe menos insolación. Haciendo un promedio del conjunto primavera-verano y del conjunto otoño-invierno, los dos efectos se anulan: la cantidad total de calor recibida por cada hemisferio a lo largo del año es idéntica.

Es justo que el nombre de Humboldt, que halló el fallo en el razonamiento de Adhémar, esté ahora asociado a la configuración de corrientes oceánicas alrededor del mundo, ya que, como hemos visto, la razón de que la Antártida sea tan fría es que las corrientes oceánicas no puedan penetrar hasta el polo. Sabemos también que hace 11.000 años la Tierra no estaba en plena glaciación, sino precisamente saliendo de ella y ya en el actual período interglacial, mientras que hace 22.000 años (cuando, según Adhémar. debía de haber un período interglacial semejante a las condiciones actuales) la glaciación más reciente estaba en su plenitud (fig. 4-5). No obstante, la idea de Adhémar tuvo su importancia en el sentido de que estimuló a los científicos a pensar acerca de cómo los cambios en la geometría orbital de la Tierra podrían realmente causar el

ciclo de las grandes glaciaciones en el hemisferio norte. Se tardó más de un siglo en que ello fructificara en una teoría aceptable del ritmo de las glaciaciones y de los períodos interglaciales, teoría que concuerda ahora exactamente con el archivo geológico, perfectamente interpretado, de las temperaturas globales durante los pasados dos millones de años o más.

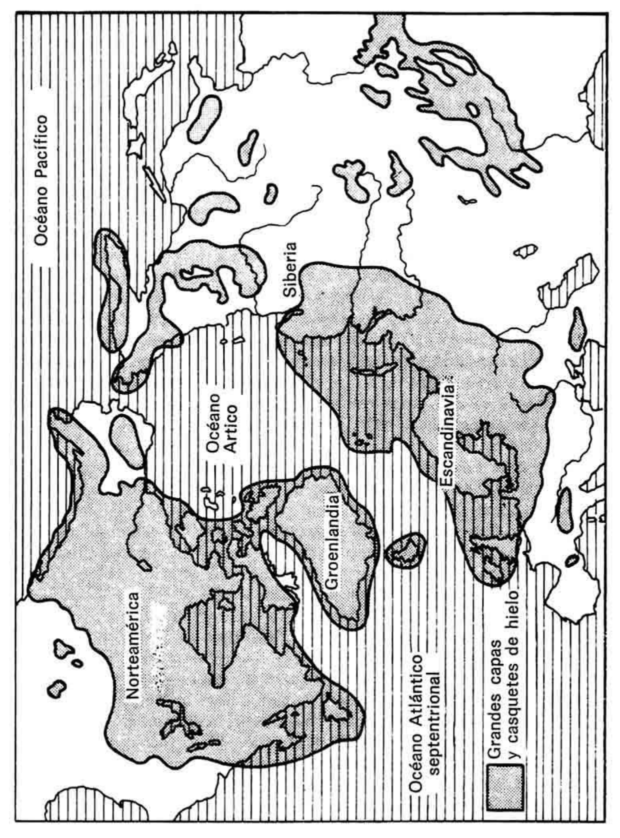


Fig. 4-5. En la plenitud del más reciente periodo glacial, hace 20.000 años, la configuración de la glaciación sobre los continentes septentrionales tenía este aspecto.

Una vez corregido el error de Adhémar, los primeros pasos a lo largo de lo que resultó el camino correcto hacia una teoría astronómica de las glaciaciones fueron dados por un escocés. James Croll, en la década de 1860. La vida de Croll se explica a veces en tono de admiración, como la historia de un genio desconocido —el conserje del Andersonian College and Museum de Glasgow— que hizo tambalearse el mundo científico con una nueva y brillante teoría de las glaciaciones. Pero esta historia, popular y atrayente, resulta engañosa. Croll siempre había tenido inclinaciones científicas y estaba dotado de una inteligencia superior a la media, pero no había tenido oportunidad de desarrollar su talento mediante una educación formal debido a la pobreza de su familia. Nacido en 1821. Croll tuvo que abandonar la escuela a los trece años de edad, y estudió ciencias como pudo, de forma autodidacta, mientras ayudaba a su madre. Se hizo comerciante, pero abandonó esta profesión para dedicarse a sus estudios; después se inició en carpintería, que hubo de dejar a causa del agravamiento de una lesión de infancia que posteriormente le dejó un codo rígido. John y Katherine Imbrie, en su obra *Ice Ages,* cuentan que Croll abrió una tienda sólo para ver cómo el negocio se hundía por falta de atención, mientras él dedicaba la mayor parte de sus energías al estudio de libros científicos, y que después desempeñó varios trabajos de corta duración (incluyendo el clásico de agente de seguros) y fracasó en otra empresa, un hotel. A lo largo de todo este tiempo, escribió un importante libro, *The Philosophy of Theism* (La filosofía del teísmo), que fue bien recibido por la crítica. En la época en que se le ofreció el puesto de conserje, Croll era ya conocido como pensador científico autodidacta, y aceptó deliberadamente el trabajo porque, aunque el salario era bajo, le daba acceso a una buena biblioteca científica y la oportunidad para estudiar su contenido. Desde su confortable nicho en el museo, comenzó a publicar trabajos científicos hacia la década de 1860, y es lógico que prestase atención al misterio de las glaciaciones, uno de los temas más importantes de debate científico en aquella época. En su reciente libro *Ice,* Sir Fred Hoyle comenta que «su trabajo resultó muy sorprendente para

el mundo académico, y dice mucho en favor de la mentalidad abierta de la Inglaterra victoriana el hecho de que, a partir de 1867. James Croll fuera aceptado por el mundo científico como un ilustre investigador». Esto me parece un comentario asombroso; la realidad es que, debido a la estrechez de miras y a las diferencias de clase de la era victoriana, el joven James Croll se vio obligado a abandonar la escuela a los trece años de edad y nunca tuvo esperanza de ingresar en una universidad. Sus logros se deben exclusivamente a sí mismo, y no a la generosidad de los científicos victorianos, que debieron de pensárselo mucho, antes de elegirlo «Fellow» (miembro de honor) de la Royal Society, prestigiosa sociedad científica británica, en 1876. Tal distinción se produjo inmediatamente después de la publicación del libro de Croll. *Climate and Time* (El clima y las épocas), resumen de diez años de su trabajo sobre la causa de las glaciaciones.

La teoría de Croll acerca de las glaciaciones, al igual que la de Adhémar, parte del hecho de la inclinación del eje terrestre y del conocimiento del ciclo de precesión de los equinoccios. Sin embargo. Croll introdujo en el argumento otro factor astronómico. A causa de la complicada interacción de las fuerzas gravitatorias entre los planetas del Sistema Solar, la forma de la órbita terrestre cambia de manera regular y previsible. La órbita es siempre una elipse, pero algunas veces ésta es casi una circunferencia, mientras que otras es mucho más alargada. Tales variaciones en la excentricidad de la órbita habían sido calculadas por el astrónomo francés Urbain Leverrier (quien, como Croll y todos los científicos de la época, carecía de la ayuda de computadores y tuvo que realizar todos los cálculos a mano), y Croll aprovechó el trabajo de Leverrier como base sobre la cual edificar su propia teoría. Cuando la excentricidad es pequeña, la órbita de la Tierra es casi circular; cuando es grande, la órbita es más alargada. La órbita varía constantemente pero de forma gradual entre ambos estados, siguiendo un ciclo de unos 100.000 años de duración. En el presente, la órbita de la Tierra es casi circular (excentricidad próxima a cero); hace montones de miles de años, era relativamente alargada (excentricidad de un 6%).

Por tanto. Croll arguyó que la órbita circular corresponde a las condiciones cálidas de un período interglacial, mientras que la órbita alargada y de gran excentricidad era la causa de la glaciación. Pero ¿cómo obraba el efecto? Aun cuando la forma de la órbita terrestre cambie, los cálculos de Leverrier mostraban que la cantidad de calor recibida por la totalidad de la Tierra en el curso de un año completo es siempre la misma (con la hipótesis implícita, por supuesto, de que la emisión de calor solar sea realmente constante). Croll intuyó que el equilibrio de calor entre las estaciones de verano y de invierno debía de ser importante, aunque el total a lo largo del año permaneciera constante. Sostenía que, si los inviernos son fríos, la nieve puede acumularse con mayor facilidad, y de este modo reflejará la radiación solar incidente y mantendrá la Tierra fría. De hecho. Croll debió de ser la primera persona que incorporó la idea de realimentación positiva en cualquier teoría científica, si bien ahora es corriente y sumamente importante en relación con las últimas ideas sobre las glaciaciones, como veremos más adelante. Así pues, si durante los inviernos del hemisferio norte la Tierra está lejos del Sol, debería producirse una glaciación.

Cuando la órbita de la Tierra es circular, no hay tal diferencia estacional de insolación para que dicho efecto actúe, lo cual parecía explicar el presente período interglacial. Incluso cuando la órbita es elíptica, parece que la precesión de los equinoccios interviene también en el delicado ajuste de la máquina atmosférica para responder a las pequeñas variaciones de insolación sobre la longitud total de la órbita de la Tierra. La teoría de Croll no estaba en contradicción con ningún dato geológico conocido en la época, y, aunque algunos científicos ponían en duda que un cambio tan pequeño en la excentricidad de la órbita terrestre (sólo unas pocas unidades por cien) pudiera tener repercusiones tan dramáticas, dicha teoría causó una enorme impresión. La controversia sobre la propuesta de Croll continuó en los círculos científicos hasta finales del siglo XIX. cuando los geólogos abandonaron la idea, al enfrentarse con las crecientes pruebas de que el último período glaciar no había finalizado montones de

miles de años antes, sino sólo hace unos 10.000 años, de modo que la Tierra todavía se encontraba en plena glaciación cuando su órbita ya era casi circular. Fue necesaria una combinación de cálculos aún mejores de los detalles de las influencias astronómicas y de medidas comparativas precisas de la extensión y contracción de los hielos durante los pasados cientos de miles de años, para demostrar finalmente que los ritmos astronómicos sí regulan las glaciaciones.

La inspiración de este desarrollo del trabajo de Croll en el siglo XX, provino del astrónomo yugoslavo Milutin Milankovič, que ha dado su nombre a la teoría astronómica de las glaciaciones.

LA TEORÍA DE MILANKOVIČ

Milankovič añadió otra influencia astronómica a los dos factores considerados por Croll. Además de la precesión de los equinoccios y de la variación de la excentricidad de la órbita terrestre, el ángulo de la inclinación de la Tierra varía, oscilando arriba y abajo entre 21,8° (más próxima a la vertical) y 24,4° (máxima inclinación) a lo largo de un ciclo de 41.000 años. La actual inclinación de 23,5° (o con más exactitud. 23,4°) está aproximadamente a medio camino entre ambas posibilidades. Durante los pasados 10.000 años, la inclinación ha ido disminuyendo. Dado que la inclinación de la Tierra es la que produce el ciclo de las estaciones, significa que las diferencias entre las estaciones son menos extremas ahora que hace 10.000 años: a igualdad de otros factores, los inviernos son un poco más templados y los veranos un poco más fríos de lo que fueron antes. Evidentemente, esta inclinación debe de tener una considerable influencia sobre cualquier mecanismo climático afectado por el ciclo de la precesión: y si realmente las diferencias estacionales de insolación son las causantes del ritmo alternante de glaciaciones y períodos interglaciales, el ciclo de la inclinación no puede ser ignorado. Esto completa la cuenta de los efectos que hacen variar la geometría orbital de la Tierra y que alteran el equilibrio de

calor recibido por cada hemisferio en las estaciones de verano e invierno. Combinando los tres efectos, es posible calcular la cantidad de insolación recibida en cualquier latitud de la Tierra en cada estación, en el momento del pasado que se desee. Esto constituía una tarea abrumadora antes del advenimiento de los computadores electrónicos, pero Milankovič calculó las curvas de radiación adecuadas en una escala de latitudes comprendidas entre 5°N y 75°N, y publicó los resultados en 1930. Su historia —una saga todavía más impresionante que la lucha de Croll por alcanzar la respetabilidad científica— está descrita con detalle en el libro de Imbries Aparte de los extensos cálculos de curvas de radiación, que proporcionaron una mina de información para una generación de climatólogos teóricos, la contribución clave de Milankovič fue incorporar una idea del climatólogo alemán Wladimir Köppen en la teoría astronómica. Este sugería que lo que conduce a una glaciación es una reducción de la insolación en verano, y no una sucesión de inviernos muy rigurosos. El argumento, considerado hoy como la piedra angular de la teoría astronómica de las glaciaciones, es que los inviernos en las regiones árticas son siempre lo bastante fríos como para que nieve y aumenten de espesor los glaciares, pero que en verano los glaciares se funden, o al menos eso hacen hoy. La manera de extender la cobertura nivosa del globo es reduciendo la fusión estival tanto como sea posible, a fin de que el nuevo crecimiento de los glaciares en invierno compense con creces las pérdidas estivales.

Esto volvió del revés la antigua idea de Croll e invirtió la pauta de intervalos calientes y fríos que la teoría «predice» («posdice» sería más adecuado) para el pasado geológico reciente. Trabajando con Köppen. Milankovič se convenció de que la forma de las curvas de insolación para latitudes del globo aproximadamente al norte de 60° concordaba muy bien con los datos geológicos de las glaciaciones: los veranos septentrionales fríos realmente coincidían con los máximos del período glacial. No obstante, las pruebas geológicas eran mucho menos precisas que las detalladas curvas de radiación calculadas matemáticamente a partir de la teoría astronómica.

En la década de 1940. la concordancia entre ambas parecía muy buena; a finales de los años cincuenta, ciertas revisiones de la escala de tiempo geológica y nuevas interpretaciones de los datos parece que pusieron en discordancia la teoría de Milankovič con respecto a la realidad, y fue abandonada por todos excepto por un pequeño grupo de climatólogos. Sin embargo, en la pasada década, una síntesis de cálculos teóricos todavía mejores (al menos, ahora contamos con computadores de gran velocidad que nos hacen sin quejarse el trabajo pesado) y unas medidas de la temperatura de la Tierra en el pasado, obtenidas con una exactitud sin precedentes a partir del análisis de muestras de sedimentos extraídos del fondo del océano, mostraron que, básicamente, Milankovič tenía toda la razón: las influencias astronómicas regulan el clima, y la estación clave es el verano del hemisferio norte.

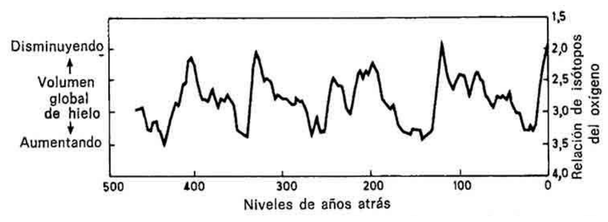


Fig. 4-6A. Datos procedentes de los cilindros de hielo analizados por Jim Hays y sus colegas, que revelan la pauta de cambios de temperatura en la Tierra durante el pasado medio millón de años. De acuerdo con esta información vivimos en un corto periodo cálido (periodo interglacial) que ha de terminar pronto, dando paso de nuevo a las condiciones propias de una glaciación si la naturaleza se sale con la suya.

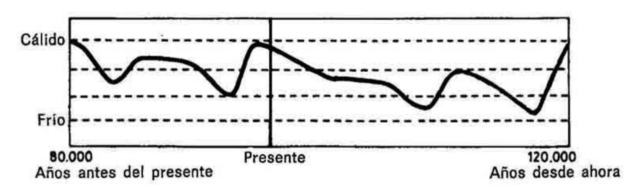


Fig. 4-6B. Los cálculos de los ritmos de Milankovič efectuados por Nigel Calder aportan detalles a la pauta actual del cambio climático. Según parece, el presente periodo interglacial ha pasado ya su máximo, de modo que vamos cuesta abajo hacia la próxima glaciación.

LA SÍNTESIS MODERNA

Aunque muchas personas han trabajado en la síntesis de la versión moderna de la teoría astronómica de las glaciaciones, dos en particular pueden considerarse representantes de las dos facetas de la propia obra de Milankovič. El astrónomo belga André Berger ha elaborado los que son probablemente los mejores y más detallados cálculos de la variable insolación estacional a diferentes latitudes, mientras que George Kukla, checo de origen y ahora residente en Estados Unidos, representa a los teóricos que han identificado *exactamente* las influencias estacionales que son importantes para la extensión o. como parece crucial ahora, la retirada de los hielos. Probablemente, la explicación científica más actualizada de la causa de los períodos interglaciales es un artículo de Kukla y Berger junto con R. Lotti y J. Brown aparecido en *Nature:* aparte del gran empeño que los teóricos han puesto en refinar la teoría de Milankovič, la razón de que hoy sea tan ampliamente aceptada es que el registro de las variaciones de temperatura de la Tierra en el pasado geológico reciente concuerda casi perfectamente con los ritmos de 100.000 años, 41.000 años y 22.000 años de los tres factores que alteran la geometría orbital de la Tierra con respecto al Sol.

Las medidas dependen de que sea posible obtener una provisión de materias primas no afectadas por los estragos de los procesos geológicos durante cientos de miles de años, y de que se pueda interpretar el material en términos de temperatura. El primer requisito se satisface gracias a la destreza que los geofísicos y oceanógrafos han desarrollado para extraer largos cilindros de sedimento de los fondos oceánicos profundos, donde se va depositando capa sobre capa de material en el transcurso de los años. Una gran parte de esta materia sedimentaria la constituyen conchas de criaturas marinas muertas, los microscópicos foraminíferos, que a lo largo de épocas geológicas producirán nuevos depósitos calizos. A medida que se acumulan los sedimentos, con los depósitos más jóvenes en la superficie y las conchas calcáreas más antiguas enterradas en lo más profundo del limo, las distintas capas de

sedimento presentes en un largo cilindro proporcionan muestras correspondientes a diferentes períodos de tiempo. Se pueden utilizar diversas técnicas para averiguar las fechas en que se depositaron muestras particulares. Por desgracia, las capas anuales no pueden contarse directamente, del mismo modo que los anillos en los árboles o que las capas de hielo en cilindros extraídos del casquete de hielo groenlandés, pero algunos elementos radiactivos presentes proporcionan una indicación de la edad, y los sedimentos aportan también indicios de variaciones en el campo magnético terrestre, fluctuaciones cuya cronología se ha podido establecer muy bien gracias al estudio de rocas continentales. Las pruebas magnéticas, en particular, ofrecen un «calendario» bastante exacto para las necesidades de los climatólogos.

Nadie sabe con exactitud cómo o por qué el campo magnético de la Tierra invierte su polaridad de vez en cuando, pero ciertamente lo hace. Los estudios de rocas magnéticas formadas en diferentes épocas de la historia de la Tierra muestran que en ocasiones los polos magnéticos norte y sur están en los hemisferios opuestos a sus posiciones actuales. Las pruebas proceden de rocas antiguas cuya cronología se ha establecido de forma precisa mediante técnicas geofísicas que utilizan un patrón fijo del magnetismo en la época en que se formaron. Los elementos magnéticos en un río de lava tienden a orientarse, como diminutas agujas magnéticas, en sentido norte-sur mientras la roca está todavía en estado fluido: pero una vez ésta se solidifica, quedan inmóviles en su lugar y no pueden cambiar de orientación aun cuando lo haga el campo magnético de la Tierra. Desde entonces, las rocas portan consigo un registro permanente —el magnetismo fósil, o palemagnetismo— de la orientación del campo magnético terrestre en la época en que las rocas se solidificaron. Es ahora evidente que muy a menudo (en términos de la escala de tiempo geológica) el campo magnético se anula primero, durante un período de unos cientos o miles de años, y después se reconstruye en un período de tiempo similar, pero en sentido opuesto. Algunas veces se anula primero y después se restablece en el mismo sentido, pero esto no afecta el argu-

mento[1]. La pauta de cambios magnéticos repetitivos a lo largo de los tiempos geológicos proporciona un calendario único que sirve para comparar otros sucesos con respecto a él. Los sedimentos de los fondos oceánicos profundos contienen material magnético, el cual se alinea con el campo magnético de la Tierra cuando se deposita. De esta manera, el paleomagnetismo proporciona a los climatólogos un método para datar los restos de foraminíferos en diferentes capas de sedimento en una muestra del fondo oceánico profundo.

Una vez fijadas las fechas, las temperaturas de tiempo atrás se determinan mediante una técnica que es una variación del mismo método de medidas de isótopos empleado en las muestras de hielo groenlandesas. El carbonato de los materiales calizos contiene oxígeno, en los mismos dos isótopos, oxígeno 16 y oxígeno 18, que cualquier otra muestra de oxígeno en la Tierra, y la relación de isótopos depende de la temperatura de la Tierra en la época en que las criaturas marinas estaban vivas. Otro método se basa en contar el número de especies distintas de foraminíferos en diferentes capas de sedimentos: algunos se desarrollan en aguas calientes y otros en aguas frías, de modo que los tipos que se encuentran en cada capa constituyen asimismo una guía de su temperatura. Desde finales de los años sesenta, las medidas cada vez más precisas y realizadas sobre muestras mejores empezaron a llenar los huecos en el esbozo de la historia de la temperatura en la Tierra a lo largo de decenas de miles de años. Finalmente, en 1976, se publicó en las páginas de *Science* lo que ahora se considera el estudio definitivo.

Jim Hays. John Imbrie y Nick Shackleton presentaron un estudio basado en el análisis de dos muestras del profundo

---

[1] Vale la pena subrayar que no hay prueba alguna de que los polos geográficos de la Tierra se inviertan mientras el campo magnético permanece estacionario. Varias curiosas «teorías» basadas en ese malentendido han aparecido en libros de ciencia ficción (lo que no está mal), pero también en libros de divulgación científica, y esto si es una tontería. La inversión de *los polos*, en geofísica, significa que los polos magnéticos se permutan, no que la Tierra se dé la vuelta en el espacio.

fondo oceánico, una de las cuales proporcionaba un registro ininterrumpido del clima de los pasados 300.000 años, y la otra, aunque deteriorada en su parte superior, ofrecía una termometría global de clara lectura para el período de 100.000 a 450.000 años atrás. Ambas muestras daban como resultado un registro inequívoco de las variaciones de la temperatura global que abarcaba casi medio millón de años, período cuya extensión permitía comprobar la presencia de incluso el más largo de los ciclos de Milankovič, el de 100.000 años. La longitud total del cilindro de sedimentos que cubre 450.000 años es de 15 m; las muestras se tomaron a intervalos de 10 cm a lo largo de la longitud de cada cilindro, los cuales representaban muestras de 150 fechas en la prehistoria, a intervalos de 3.000 años, período de tiempo lo bastante reducido como para proporcionar una precisa indicación de la existencia del más corto de los ciclos de Milankovič, el de 22.000 años. En la época en que estas muestras fueron analizadas, ya estaba claro, a partir de muchas investigaciones similares y de otros datos geológicos, que las glaciaciones se producen simultáneamente en ambos hemisferios del globo, al menos durante la presente época glaciar. Esto constituyó un rompecabezas para los teóricos, y pareció que descartaba la sencilla versión de la teoría astronómica desarrollada por Milankovič, pero significaba que las dos muestras del océano índico podían considerarse representativas de la totalidad del globo. El análisis estadístico de las muestras, llevado a cabo por Imbrie, no da lugar a dudas. La pulsación dominante del clima, revelada por la prueba de los isótopos y otras técnicas, era en realidad de 100.000 años, con menores pero aún claras indicaciones de ciclos a 42.000-43.000 años, a 23.000-24.000 años y, curiosamente, a 19.000-20.000 años. No existía ninguna otra variación cíclica importante en ninguna escala de tiempo desde 10.000 hasta 100.000 años, y la concordancia con la teoría astronómica, aunque no perfecta, parecía buena exceptuando el raro ciclo de 19.000 años. La diferencia entre 41.000 y 43.000 años, por ejemplo, es menor del 5% —ciertamente dentro de los posibles errores en las técnicas de medición— y el ciclo de 19.000 años podría ser debido, al fin y al cabo, a

algún otro proceso. Nadie había dicho que *sólo* los ciclos de Milankovič determinasen la pauta de las variaciones de temperatura.

Sin embargo, cuando Imbrie verificó sus resultados con André Berger, tuvo una agradable sorpresa. Berger, que con la ayuda de modernos computadores podía desmenuzar las cifras para refinar la teoría astronómica, descubrió que el ciclo de precesión no es tan sencillo como parece en un principio. En lugar de tratarse de una variación única de 22.000 años, está constituido por dos variaciones cíclicas emparejadas, una de 23.000 años de duración y la otra, menos importante, de 19.000 años. El cilindro de sedimentos no sólo había encontrado los tres ciclos de Milankovič esperados, sino que también había revelado que uno de los tres ciclos es en sí mismo doble: algo que los teóricos no habían previsto, aunque pudieron explicarlo una vez descubierto. Esto convenció aún más a los científicos de la validez de la teoría básica de Milankovič. Todavía quedaba por explicar, sin embargo, el proceso físico que convertía el modelo de variaciones estacionales de insolación en una pauta repetitiva de glaciaciones y períodos interglaciales.

La explicación todavía no es completa, pero en 1981, cinco años después de la publicación de los resultados de las pruebas del océano índico, los teóricos estaban evidentemente bien encaminados para dar una explicación convincente. El artículo de Kukla, Berger y sus colegas resume el estado de conocimientos actual, y sería sorprendente que se produjeran cambios importantes en este modelo, en sí mismo la moderna síntesis de la teoría. La síntesis parte del punto de vista crucial de que el estado *normal* de la Tierra hoy día debería ser la plenitud de una glaciación, merced a la presente distribución de los continentes, y que la función de la teoría astronómica no es, por tanto, explicar por qué se producen las glaciaciones, sino por qué están entremezcladas con cortos períodos interglaciales. Kukla y su equipo utilizaron diversos indicadores climáticos del pasado, incluyendo la técnica de los isótopos del oxígeno, para construir un cuadro completo de las fluctuaciones globales de temperatura a lo largo de los pasa-

dos 350.000 años, y después observaron con detalle los ritmos astronómicos a fin de identificar la pauta característica de esos efectos que precede al comienzo de un período interglacial. Incluso en el transcurso de una glaciación, hay variaciones de temperatura, y el hielo avanza y se retira al unísono con los ritmos astronómicos; los períodos cálidos tienden a darse cuando el perihelio tiene lugar en septiembre, mientras que las fases más frías de las fluctuaciones de una glaciación culminan cuando el perihelio es en marzo. No obstante, los verdaderos períodos interglaciales, a diferencia de una suavización temporal de las peores condiciones de una glaciación, son mucho más raros. En los pasados 350.000 años sólo ha habido cuatro períodos interglaciales, que comenzaron hace 335.000, 220.000, 127.000 y 11.000 años: la única característica que relaciona los períodos interglaciales recientes es que se iniciaron cuando el perihelio se daba en junio y la inclinación de la Tierra era superior a 23,8°. Sin el perihelio en junio, el efecto de inclinación por sí solo no basta para producir una retirada del hielo importante; sin el efecto de inclinación, aun con el perihelio en junio, el calor estival es insuficiente para fundir los glaciares. Sin embargo, cuando la inclinación es grande —de modo que la diferencia entre estaciones es acusada— y el perihelio tiene lugar en junio, aportando también veranos muy cálidos e inviernos extraordinariamente fríos, ambos efectos juntos son capaces de fundir suficiente hielo para aliviar de manera temporal las condiciones de una glaciación.

Ante estas pruebas, queda claro que Milankovič tenía razón en un punto de suma importancia. Los períodos interglaciales se producen realmente cuando hay el máximo calor estival disponible para fundir el hielo del hemisferio norte El verano es la estación clave. ¿Por qué el hemisferio sur sigue la misma pauta? Una posible explicación es que, de manera fortuita, se necesitan precisamente las condiciones opuestas para favorecer el crecimiento de los hielos en el sur. Mientras que los veranos septentrionales frescos permiten que la nieve que cae sobre las tierras circundantes del Ártico no se funda y se acumule en forma de capas de hielo, en el hemisferio sur

no hay tierras libres de hielos cerca del polo ni siquiera hoy, y la nieve que cae sobre el mar se fundirá haya o no insolación Para favorecer la extensión de los hielos marinos en el sur, necesitamos inviernos meridionales muy rigurosos, capaces de congelar el agua del mar. Y como los inviernos fríos en el sur van acompañados de veranos fríos en el norte, la curiosa geografía actual del globo puede ser responsable de la producción de glaciaciones en fase en ambos hemisferios. La otra manera de enfocar el rompecabezas es decir que el sur se encuentra siempre en una glaciación, y que sólo el hemisferio norte varía algo realmente a causa de las variaciones estacionales de insolación, de modo que la totalidad de la pulsación global de temperatura, indicada por el termómetro isotópico, está regida por las condiciones en el norte. Desde este punto de vista, el sur se enfría y calienta con el mismo ritmo que el norte, pero directamente, debido a la influencia que las variaciones del hemisferio norte ejercen sobre la temperatura de la totalidad del globo y a las formas de circulación de las grandes corrientes oceánicas. Éste es un aspecto de las glaciaciones que todavía ofrece abundante campo a los investigadores. Como veremos en seguida, la línea de ataque más prometedora para resolver estos aspectos restantes del rompecabezas estriba en mejorar nuestra comprensión de las interacciones entre los océanos y la corteza de hielo que los cubre; pero, en primer lugar, es justo decir que algunos teóricos todavía no están convencidos por las pruebas a favor de la teoría de Milankovič en su forma moderna.

UNA VOZ EN DESACUERDO

La voz discrepante se ha hecho oír recientemente por parte de Sir Fred Hoyle, astrofísico inglés. En su obra *Ice*. Hoyle descarta los efectos de Milankovič por ser demasiado pequeños, en términos de la energía implicada en las variaciones de insolación, para explicar la magnitud de las fluctuaciones de temperatura en la Tierra durante la presente época glacial. Acepta que los ritmos de Milankovič se pongan de manifiesto

en los análisis de isótopos en muestras del fondo de los océanos, así como en otros datos, pero cree que esto es debido simplemente a la débil influencia moduladora de los ritmos astronómicos sobre las capas de hielo existentes. Los climatólogos deben de estar de acuerdo con ello: saben muy bien que la causa esencial de la presente época glacial es la distribución de continentes sobre la superficie de la Tierra, y que los ciclos de Milankovič son, figuradamente hablando, pequeñas ondas en la superficie de la gran época glacial. Hoyle discrepa del acuerdo común, sin embargo, en su idea de que ni siquiera todos los ciclos de Milankovič actuando conjuntamente serían capaces de sacar a la Tierra de una auténtica glaciación y de dejarla en un estado interglacial temporal. En lugar de ello, prefiere suponer que el impacto de meteoritos gigantes con la Tierra puede causar el brusco comienzo de condiciones de plena glaciación, así como la llegada repentina de las condiciones interglaciales.

Esta es una idea tan fascinante que merecería ser correcta, y aquí difícilmente puede hacerse justicia a una teoría que Hoyle expone en un libro entero. En términos esquemáticos, arguye que el impacto de un gran meteorito de piedra sobre la Tierra puede causar un enfriamiento dispersando polvo en la atmósfera, como lo haría una poderosa erupción volcánica, e impidiendo así la llegada del calor del Sol. Señala Hoyle correctamente que los océanos del globo almacenan grandes cantidades de energía calorífica, y sostiene que una glaciación únicamente se iniciará si la capa de polvo persiste durante un tiempo suficiente para que este calor se disipe a medida que se enfría la Tierra. A una temperatura crítica, la propia atmósfera se enfriaría tanto que las diminutas gotitas de agua suspendidas en la estratosfera se congelarían en forma de partículas de hielo, constituyendo el altamente reflector «polvo de diamante», el cual se encargaría entonces de reflejar el calor solar una vez que la capa de polvo levantada por el meteorito se hubiera sedimentado. Para terminar con una tal glaciación se requiere un acontecimiento igual de espectacular capaz de fundir el «polvo de diamante», Hoyle apunta la posibilidad de que un meteorito metálico cayera sobre la Tierra, dispersando

no polvo, sino una capa de material conductor en toda la alta atmósfera. El material metálico conductor absorbería el calor solar, causando una elevación de la temperatura suficientemente notable como para fundir el «polvo de diamante» y dar comienzo a un periodo interglacial.

Según Hoyle, en el Sistema Solar hay unas diez veces más meteoroides rocosos que meteoroides metálicos, de modo que, en términos generales, las glaciaciones deberían ser diez veces más corrientes que los períodos interglaciales. Se puede sospechar, sin embargo, alguna falacia en el argumento, ya que éste no da cuenta del espaciado relativamente regular de los períodos interglaciales, de unos 10.000 años de duración, separados por glaciaciones, cada una de las cuales dura unos 100.000 años. Tampoco la teoría ofrece esperanza alguna de explicar —salvo por una coincidencia— las pruebas aportadas por algunos estudios de que, mientras los climas del pasado millón de años han sido regidos por los tres ciclos de Milankovič aquí esbozados, la pauta de hace de uno a dos millones de años era que las fases más frías de las glaciaciones se presentaban con menor intensidad y que la pulsación o ritmo dominante de los climas parece que procedía del ciclo de 41.000 años y no del de 100.000. La solución de este problema podría estribar en una combinación del modelo de Milankovič y la teoría de la deriva continental, lo cual quizá proporcionaría nuevos puntos de vista a ambos campos de estudio. La teoría del meteorito carece de explicación para estos hechos.

Es evidente, sin embargo, que ha habido meteoritos gigantes que han chocado contra la Tierra, y muy posiblemente podrían haber iniciado una glaciación —aun cuando las posiciones de los continentes no fueran las adecuadas para una época glacial propiamente dicha— mediante la dispersión de polvo en la estratosfera. De hecho, hay una respetable opinión acerca de que un suceso de este tipo podría haber sido responsable de la desaparición de los dinosaurios hace unos 65 millones de años. No obstante, parece bastante improbable que dos clases distintas de meteoritos coincidieran en chocar contra la Tierra no a un ritmo regular, sino de una manera

que, para los climatólogos terrestres, se muestra exactamente en concordancia con los ritmos de Milankovič. En definitiva, la teoría de Hoyle no sirve para explicar las fluctuaciones en la escala de transiciones glacial-interglacial: requiere un proceso muy radical y raro, y es demasiado aleatoria para ajustarse a la sucesión temporal de períodos interglaciales. Estoy seguro de que Hoyle se equivoca al considerar que los impactos meteoríticos pueden explicar la pauta regular de las recientes fluctuaciones climáticas, y no sólo sucesos catastróficos como la desaparición de los dinosaurios. Asimismo, no dudo de que tiene razón en destacar el papel de los océanos en la determinación de la pauta de las fluctuaciones climáticas más importantes —la incidencia de períodos interglaciales— durante la presente época glacial. Irónicamente. justo un mes antes que apareciera el entretenido pero engañoso libro de Hoyle, se publicó en *Science* (mayo de 1981) un estudio basado en un modelo combinado de la teoría de Milankovič y la realimentación de los océanos para explicar los períodos interglaciales, el cual abre el camino para ulteriores investigaciones sobre este aspecto del problema.

EL PAPEL DE LOS OCÉANOS

De nuevo, el estudio mencionado procedió de un grupo de investigadores del Lamont-Doherty Geological Observatory, que es evidentemente el centro mundial en lo que respecta a la continuación del desarrollo de la moderna teoría astronómica de las glaciaciones. Esta vez los investigadores que tomaron parte fueron William Ruddiman y Andrew McIntyre, y el período que eligieron para examinar con detalle fueron los pasados 250.000 años. Partieron de las pruebas ofrecidas por el registro isotópico de que las curvas de insolación que las latitudes 45 y 65°N reproducen la pauta de fluctuaciones del hielo que tal registro revela (lo que podría ser una mera coincidencia), y trataron de hallar una razón física de esta concordancia. Dado que la mayor parte del calor mundial se almacena en los océanos, allí fue donde, al igual que Hoyle,

buscaron la fuerza impulsora. Y parece que la han encontrado.

Dejando aparte los detalles de los cálculos efectuados por Ruddiman y McIntyre, su explicación acerca de la sucesión de glaciaciones y períodos interglaciales y del probable mecanismo de realimentación del Atlántico Norte puede exponerse en términos simples. Sabemos, a partir de los estudios de isótopos y otras pruebas, que cuando los hielos crecen con rapidez los veranos son relativamente frescos. Sin embargo, los océanos tardan algún tiempo en enfriarse tras los templados períodos interglaciales, por lo que en esta fase del ciclo climático, cuando la Tierra ha empezado a entrar en una fase de inviernos fríos (en el hemisferio norte), habrá una amplia reserva de calor oceánico para mantener el Atlántico libre de hielos. Esto supone un gran aporte de vapor de agua que pasa al aire desde la caliente superficie del océano y que después caerá en forma de nieve a altas latitudes durante los fríos inviernos, acumulando rápidamente capas de hielo y acelerando la entrada de la Tierra en una glaciación. Las glaciaciones están relacionadas con veranos frescos, que no pueden fundir las recién formadas capas de hielo; los veranos frescos suelen ir acompañados de inviernos templados, y esto asegura la eficaz evaporación del agua oceánica y proporciona un empujón adicional al proceso mediante el cual se evapora el agua, cae en forma de nieve y se acumula formando glaciares. Con el tiempo, los océanos se enfrían y los hielos marinos se extienden a lo largo de sus orillas septentrionales: pero, para entonces, el mundo está ya atenazado por una glaciación, y el alto albedo del propio hielo ayuda a mantener las frígidas condiciones, aun con una evaporación mucho menor y unas nevadas muy reducidas. Entonces, ¿cómo acaba una glaciación?

En una época de rápida fusión de los hielos, la configuración orbital causa una insolación excepcionalmente intensa en verano sobre las latitudes cubiertas de hielo del hemisferio norte, lo cual queda compensado por la rigurosidad de los fríos invernales. El primer paso en el comienzo de un período interglacial corresponde, según los cálculos de Ruddiman y

McIntyre, a un aumento de la cantidad de hielo desprendido de los glaciares en los cálidos veranos, con la consiguiente dispersión de grandes icebergs y, a medida que éstos se funden, a un aumento en el nivel del mar que fuerza las aguas marinas bajo las capas de hielo costeras, de tal modo que éstas se rompen, produciendo nuevos icebergs Esto es exactamente lo que ocurrió hace de 16.000 a 13.000 años, al final de la última glaciación. El mayor efecto de la irrupción de icebergs tiene lugar entre 40 y 55°N en el Atlántico, donde los 100 m superiores del océano deben de haberse enfriado varios grados durante el deshielo inicial. Por tanto, el período interglacial en el que vivimos, así como los anteriores, dieron comienzo con veranos cálidos y océanos fríos, todavía cubiertos en gran parte por hielos marinos. Ambos factores se combinaron para hacer mínima la evaporación del agua desde la superficie del océano: no es posible la evaporación bajo una tapadera de hielo, y muy poca se evaporará incluso de las aguas libres de hielos si la temperatura de éstas es próxima a cero grados. Así, aunque los inviernos en aquella época eran fríos, había muy poca humedad disponible para condensarse en forma de nubes y producir nevadas que pudieran reponer ¡as pérdidas que los glaciares sufrían extensamente durante los veranos.

La cubierta de hielo ejerce también un efecto sobre nuestro amigo, el vórtice circumpolar. La trayectoria de las depresiones del oeste tiende a seguir el borde de los hielos marinos bajo condiciones de período glacial, y esto ayuda a mantener las depresiones circulantes, y la humedad contenida en ellas, al sur de los hielos que se retraen. El modelo explica claramente por qué una combinación de los ciclos de 100.000 y de 23.000 años rige la pauta de las fluctuaciones recientes de glaciaciones y pone de manifiesto el descubrimiento, bastante sorprendente y deducido del termómetro isotópico, de que el ritmo de 100.000 años es la característica dominante. Durante cada largo ciclo de 100.000 años subsiguiente a un período interglacial, el hielo sigue acumulándose, aun cuando la acumulación sufre retrocesos a intervalos de 23.000 y de 41.000 años. Cada acumulación sucesiva es mayor que la precedente

y compensa con creces el hielo perdido durante el retroceso. Sin embargo, cuanto más espesa es la capa de hielo, tanto más eficaces son los procesos de realimentación que ayudan a que los hielos se desintegren en la fase apropiada del ciclo de precesión de 23.000 años. Incluso una intensa influencia de la precesión por paradójico que parezca, no causa un deshielo rápido cuando hay sólo una moderada capa de hielo; pero, una vez que la extensión de los hielos alcanza cierto valor, la próxima vez que la precesión comporte un perihelio en junio y un verano cálido, la desintegración es inevitable. La terminación o el final de una glaciación siempre tienen lugar en la época del primer máximo precesional después de haberse acumulado un gran volumen de hielos. En números redondos, hacen falta cuatro ciclos precesionales para que se acumule suficiente hielo, y cuatro periodos de 23.000 años se aproximan mucho a 100.000 años. La sorprendente intensidad del ciclo de 100.000 años en el archivo global de temperaturas queda así explicada: lo que los isótopos miden en realidad es un pequeño y genuino efecto de 100.000 años al que se superpone un falso ciclo de 100.000 años, que es el producto de una intensificación del ciclo de 23.000 años después de una acumulación suficiente de las capas de hielo.

Estos cálculos y el estudio llevado a cabo por el equipo de Kukla, que sugiere el importante papel del ángulo de inclinación, no concuerdan completamente, lo cual no es raro pues ambos son muy recientes. Los teóricos gustan de explicar las cosas mediante sus ideas predilectas en ese momento, y sólo de mala gana aceptan otras teorías para dar una mejor perspectiva de cómo son realmente las cosas a medida que pasan los años y aumentan las pruebas. Todavía queda mucho por investigar antes de poder dar por definitiva la teoría astronómica de las glaciaciones, pero el trabajo hecho hasta ahora no deja lugar a dudas de que los ritmos de Milankovič conforman la presente época glacial y explican la aparición de los períodos interglaciales. Esto es indudable salvo que, como Hoyle, el lector esté a favor de una teoría tan sumamente diferente que para asimilarla hay que hacer caso omiso de

todas las pruebas que confirman ideas como las de Ruddiman y McIntyre.

LA PRÓXIMA GLACIACIÓN

Así pues, ¿cuándo empezará la próxima glaciación? Por el momento, estamos viviendo merced a los beneficios acumulados del ya antiguo período interglacial. De una estación a otra y de un año a otro, los océanos ayudan hoy realmente a mitigar los extremos de temperatura sobre gran parte de las zonas templadas: el agua caliente próxima nos mantiene cómodos en invierno, mientras que el agua fresca impide que pasemos demasiado calor en verano. Éste es un ejemplo de realimentación negativa, un amortiguamiento de los valores extremos: es tal vez lógico que, hasta hace poco, muchos climatólogos atribuyeran la misma clase de efecto negativo a los océanos cuando se trataba de elaborar teorías que explicasen las fluctuaciones entre glaciaciones y períodos interglaciales: pero se equivocaban. Los océanos calientes de hoy son, a más largo plazo, una amenaza, pues aportan a la atmósfera una gran riqueza de humedad que podría, en el momento oportuno, inclinar el fiel de la balanza para cubrir la totalidad de los continentes septentrionales de una capa de nieve que persistirá durante cientos de miles de años. Ruddiman y McIntyre no precisan el mecanismo exacto del desencadenamiento de una nueva glaciación, aunque exponen con gran detalle la fecha del comienzo de un período interglacial. Quizás aquí es donde realmente se hace valer la labor de Kukla. Berger y otros colaboradores en Lamont. Ellos sostienen que un gran ángulo de inclinación es precisamente lo que se necesita para favorecer la desintegración de los hielos marinos, siempre que el ciclo de precesión esté en la fase correcta, pero también van más lejos, comparando la pauta de los cambios de insolación que se puede calcular para las latitudes críticas en el futuro inmediato, con la pauta que ha sido característica del final de los cuatro períodos interglaciales más recientes. La conclusión es clara. Las épocas más calientes del presente

período interglacial están ya atrás, y nos aproximamos con rapidez a una configuración orbital apta para una vigorosa glaciación. El curso natural de la temperatura desciende notablemente desde ahora hasta el primer mínimo de frío de la próxima glaciación, que tendrá lugar aproximadamente dentro de 4.000 años. Entre el presente y ese mínimo, es imposible predecir con exactitud cuándo retornarán los hielos, pero dado que el ángulo de inclinación de la Tierra ha llegado ya a 23,4° y disminuye, de modo que la diferencia entre las estaciones se está reduciendo y el afelio actual se da en julio, los veranos del hemisferio norte son ya lo bastante frescos como para que las capas de hielo permanezcan una vez se hayan establecido. No sólo las condiciones «normales» de la presente época son las de una glaciación mientras vivimos en un período interglacial, sino que, en términos de la geometría orbital, el período interglacial ha terminado ya, pero hemos tenido la suerte de no tener una sucesión de inviernos rigurosos suficientemente notable para establecer de nuevo las capas de hielo. Pudo haber ocurrido en la «pequeña glaciación»; puede no volver a ocurrir en otro par de milenios. Podría tener lugar en el próximo siglo; ciertamente, ocurrirá dentro de los próximos 4.000 años. Después, el mundo quedará inmerso en una glaciación durante otros 100.000 años antes del siguiente período interglacial.

¿Tiene esta conclusión algún valor práctico? Nos dice una cosa muy importante. El calor del máximo del período interglacial, el «óptimo climático», ha pasado no temporalmente, sino para más de 100.000 años. Si la Tierra se encuentra ya realmente en la cuesta abajo hacia la próxima glaciación, no debemos esperar más óptimos climáticos, ni siquiera pequeños óptimos climáticos, sino que debemos esperar más pequeñas glaciaciones en el camino hacia la grande. Si ésta llega dentro de cien años, se han acabado las apuestas y todo lo que la humanidad puede hacer es aprender a vivir con ella. Sin embargo, si la gran glaciación se espera un par de milenios, lo que parece muy probable, entonces deberíamos hacer planes para un clima normal que no fuese mejor que el clima normal del pasado milenio. Nuestra regla de que el clima del

pasado milenio puede ser nuestra mejor referencia para el clima del milenio próximo requiere una pequeña modificación; a juzgar por el éxito del modelo de Milankovič para explicar la aparición y la duración de los períodos interglaciales, el clima del pasado milenio, incluyendo los siglos de la «pequeña glaciación», fue probablemente bastante mejor que lo que la naturaleza nos prepara para el próximo. En una escala cronológica de décadas y siglos, sin embargo, todavía hay lugar para alguna variabilidad a nivel demasiado pequeño para apreciarla si se compara con la transición de una glaciación a un período interglacial, pero de vital importancia para la humanidad. Frente al telón de fondo de un continuo empeoramiento natural y a largo plazo del clima, podemos ahora poner en perspectiva esos destellos temporales.

V. LA RELACIÓN CON EL SOL

La máquina atmosférica es impulsada por el calor del Sol, y cualquier variación en la cantidad de calor solar que llega a la superficie de la Tierra afecta el funcionamiento de la máquina atmosférica. La teoría de Milankovič muestra lo importantes que pueden ser las variaciones estacionales del calor del Sol, aun cuando el valor medio a lo largo de todo el año no cambie. Pero ¿y si la insolación media, o calor que llega a la superficie de la fierra, varía? No hay duda de que el Sol cambia de forma manifiesta. Algunas veces está relativamente tranquilo, y su superficie no presenta irregularidades, mientras que otras veces produce grandes brotes de fulgurante actividad, tormentas solares, y su disco visible está salpicado de zonas oscuras, llamadas manchas solares. Desde hace cien años, los astrónomos saben que las tormentas y las manchas aparecen y desaparecen a lo largo de un ciclo de unos 11 años de duración que se repite, desde un mínimo (Sol tranquilo) a un máximo (Sol tormentoso). Y, desde hace cien años, se ha especulado sobre si esas variaciones de la actividad solar podrían afectar las condiciones meteorológicas en la Tierra. De acuerdo con los mejores datos actuales, aunque el brillo total del Sol no varía más de unas décimas por ciento a lo largo de su más o menos regular ciclo de actividad, tanto las fulguraciones individuales como el nivel medio de actividad de fulguración en un ciclo solar completo pueden alterar las condiciones meteorológicas en la Tierra. En una escala de tiempo algo mayor, el nivel medio de actividad del Sol es vinculable a variaciones en la atmósfera de la Tierra que son responsables de pequeñas glaciaciones y de los pequeños óptimos climáticos, no porque la cantidad de calor emitida por el Sol varíe, sino porque la corriente de partículas emitidas por el Sol a través del espacio afectan la transparencia de la atmósfera terrestre.

La fascinación producida por el ciclo de 11 años de las manchas solares fue lo primero que llevó a los astrónomos y a los meteorólogos a especular acerca de las posibles relaciones entre la actividad solar y el tiempo. Sin embargo, tiene más sentido fijarse en primer lugar en los efectos de las tormentas solares individuales sobre la atmósfera terrestre y después analizar las influencias que se extienden a lo largo de varios ciclos solares Las pruebas son claras, y han sido muy bien expuestas en artículos publicados en re vistas científicas durante los pasados treinta años más o menos, pero es sorprendente lo poco conocidas que son fuera de esos círculos especializa dos. El trabajo pionero de Walter Orr Roberts, ahora en el Aspen Institute de Colorado, y de sus colegas llamó la atención de la comunidad científica sobre las indicaciones de que las borrascas a altas latitudes de la Tierra, en especial las que cruzan Alaska procedentes del Pacífico, son más activas de lo normal poco después de un brote de fulguraciones en el Sol. Cuando el Sol produce una gran fulguración, una corriente de partículas cargadas eléctricamente —sobre todo protones— recorre el espacio interplanetario pasando junto a la Tierra. Algunas de ellas, aprisionadas en el campo magnético terrestre, describen espirales hacia los polos magnéticos, donde dan lugar a brillantes auroras o luces en el cielo producidas por el mismo proceso que se desarrolla en un tubo de neón. Las partículas cargadas también afectan el campo magnético que medimos en la Tierra, o campo geomagnético. Y las observaciones, que ahora ya abarcan una generación, muestran que hay variaciones en sistemas borrascosos en formación en la Tierra y cambios de la presión medida en la superficie en puntos del noroeste de Europa y Norteamérica, dos o tres días después del brote de actividad geomagnética y auroral que indica la llegada de chorros de partículas procedentes del Sol. No es sorprendente hallar los efectos concentrados en las latitudes de Alaska, la parte septentrional de Estados Unidos y el noroeste de Europa, ya que las partículas solares cargadas son concentradas justo en esta región por el campo magnético de la Tierra; y, como hemos visto, esas son precisamente las latitudes donde modestas perturbaciones,

cualquiera que sea su origen, pueden ejercer un profundo efecto sobre el clima. Es un problema explicar con precisión cómo funciona la cadena de causas y efectos. No hay una teoría realmente satisfactoria que dé cuenta del hecho observado de que los protones solares que llegan en brotes a la cima de la atmósfera cambian de verdad el tiempo, al menos en una parte del mundo, algunos días más tarde. El hecho de que lo hagan, sin embargo, es una introducción de enorme importancia al descubrimiento, de otro modo sorprendente, de que el nivel de actividad solar de año a año y de decenio a decenio afecta no sólo al tiempo a lo largo de un día o dos, sino al clima del globo —el «tiempo promedio»— en el transcurso de una vida humana o más.

EL SOL Y EL TIEMPO

Durante la mayor parte de los cien años transcurridos más o menos desde que causaron fascinación los ciclos de manchas solares, las afirmaciones de que esas variaciones en el Sol afectan el tiempo en la Tierra han tropezado con el mismo problema: no había mecanismo conocido que pudiera explicar el enlace entre manchas solares y tiempo. Esto no parece que preocupara demasiado a los científicos de la época victoriana, que felizmente pretendieron haber probado la existencia de correlaciones entre el ciclo de 11 años del Sol y los cambios en la Tierra tan diversas como las variaciones del nivel del agua en lagos de África, la abundancia de cosechas en Inglaterra y las fluctuaciones del mercado de valores. De vez en cuando, ciertos «descubrimientos» de influencias del Sol sobre la vida en la Tierra, realizados en pleno siglo XX, han sido también exóticos, si bien en círculos científicos se han considerado generalmente como de dudosa garantía. En la década de 1970, pruebas estadísticas cada vez mejores, unidas al uso de computadores electrónicos de alta velocidad, han demostrado que en los datos meteorológicos existen ritmos de 11 años y otros que sólo pueden explicarse por la influencia de las variaciones de la actividad solar. Los efectos son pe-

queños, pero mensurables. Al mismo tiempo, los astrónomos que se ocupan de las causas del ciclo de actividad del Sol, tratando de explorar la naturaleza del interior de éste mediante observaciones de partículas llama das neutrinos, han encontrado nuevas incógnitas, lo cual indica que no sabemos cómo funciona el Sol tan bien como creíamos. La pregunta de por qué cambia el nivel de actividad del Sol, así como el misterio de los neutrinos solares, han de ser pasados por alto en este libro[2]. La cuestión es que, al haber visto sus esperanzas destrozadas, algunos climatólogos y astrónomos han examinado de nuevo, con mente abierta, las posibles correlaciones entre cambios en el nivel de actividad del Sol y el clima de la Tierra. Esta vez los resultados no presentan ambigüedad: cuando el Sol está tranquilo, la Tierra está fría.

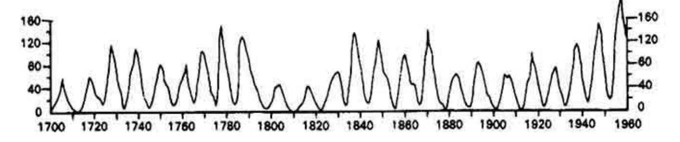


Fig. 5-1. El nivel cambiante de la actividad solar desde 1700, medida en términos del número de manchas solares. Cuando el Sol está tranquilo, como a principios del siglo xix, la Tierra se enfría.

La base de esos estudios es la pauta observada sobre la actividad de las manchas solares, pero nadie sugiere que las manchas en sí mismas alteren el tiempo en la Tierra. Lo que sí sabemos de las observaciones llevadas a cabo en la actualidad es que un gran número de manchas en el Sol indican una creciente actividad de fulguraciones, con un notable movimiento de chorros de partículas a través del espacio en lo que se conoce como viento solar, mientras que la ausencia de manchas, por el contrario, implica Sol tranquilo y débil viento solar. Por tanto, cuando los archivos históricos revelan, como así sucede, que durante la fase más intensa de la «pequeña glaciación» en Europa, de 1645 a 1715, no había casi mancha

[2] Sin embargo, se tratan con detalle en mi libro *The Death of the Sun* (La muerte del Sol).

alguna en el Sol y muy pocos indicios del ciclo de actividad de 11 años, eso nos debe hacer pensar.

Partiendo de esta observación. Stephen Schneider y Clifford Mass, del National Center for Atmospheric Research de Estados Unidos, compararon el nivel variable de actividad de manchas solares desde el siglo XVII (por desgracia, no hubo observaciones exhaustivas con anterioridad al año 1600 de nuestra era), con las variaciones de temperatura de la Tierra. No tuvieron en cuenta las variaciones anuales, sino que investigaron la «intensidad» media de la actividad de las manchas solares en cada ciclo comparada con la temperatura de la Tierra, y descubrieron una perfecta correlación entre las subidas y bajadas de temperatura y la mayor o menor cantidad de manchas solares. El número de manchas solares es la medida típica de actividad solar que usan los astrónomos; dicho número se basa en la superficie del disco solar cubierta por manchas, pero, por ejemplo, un número de manchas solares de 50 no significa literalmente que haya 50 manchas visibles. Un alto número de manchas solares indica que el Sol es muy activo, incluyendo una mayor frecuencia de grandes fulguraciones y un viento solar muy fuerte y racheado. Schneider y Mass descubrieron que las variaciones de temperatura en la Tierra a lo largo de los pasados tres siglos se puede explicar bien si la cantidad de calor que alcanza la superficie de la Tierra varia acompasadamente con el número de manchas solares. El efecto es el mismo que si la emisión de calor solar fuera un 2% más baja cuando no hay manchas solares que cuando el número de ellas se halla aproximadamente entre 80 y 100, y vuelve al mismo nivel que cuando no hay manchas si el número de éstas alcanza 200 o así que viene a ser el más alto que se encuentra en ciclos de extraordinaria actividad solar (fig. 5-2).

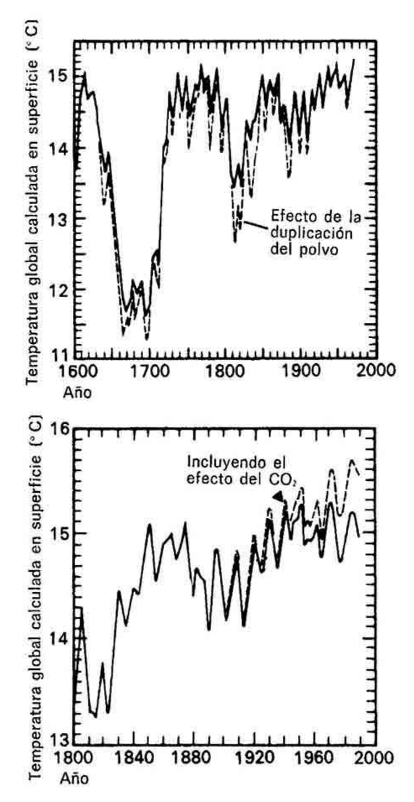


Fig. 5-2. Mediante un programa de computador que tenía en cuenta tanto los efectos del polvo volcánico como los de las variaciones solares, Stephen Schneider y Clifford Mass pudieron «predecir» la pauta de variaciones de temperatura en la Tierra desde 1600. El resultado concuerda bastante bien con las variaciones de temperatura reales. Pero si se incluye el previsto «efecto invernadero» debido al dióxido de carbono en el periodo más reciente, la sugerencia es que todos esos procesos naturales pueden ser más que compensados a consecuencia de actividades humanas.

El «que si» es una importante advertencia, pues Schneider y Mass trabajaban primordialmente con medidas en la superficie de la Tierra o en la baja atmósfera. Podría ocurrir que la emisión calorífica del Sol variase en un 2% —aunque los astrónomos se horrorizaron ante la idea— o bien que algo

relacionado con el ciclo de actividad solar alterase la transparencia de la atmósfera terrestre, afectando la cantidad de calor que la atraviesa y llega al suelo. En la época en que Schneider y Mass hicieron sus cálculos, a mediados de los setenta, se habían llevado a cabo varios lanzamientos de globos que transportaban instrumentos a la estratosfera, a 25 o 30 km sobre el suelo, en un intento de medir con exactitud la cantidad de calor emitida por el Sol, o constante solar. Estas medidas mostraron realmente indicios de una variación bastante adecuada para explicar los cambios climáticos de los pasados 300 años, pero las pruebas no eran concluyentes, ya que, incluso a esas alturas, los instrumentos estaban todavía dentro de la atmósfera terrestre. Desde 1975, los instrumentos a bordo de satélites tales como los de la serie Nimbus han hallado que la constante solar es, como habían predicho los astrónomos, prácticamente constante. Hasta ahora, las observaciones se han efectuado sólo a lo largo de la mitad de un ciclo de manchas solares, por lo que no pueden considerarse definitivas. Sin embargo, la mejor evidencia es que la constante solar únicamente varía en algunas décimas por cien en una escala de tiempo importante para la humanidad, y que el eslabón entre el Sol y el tiempo ha de buscarse en la misma estratosfera. En breve diremos algo más sobre esto. En los años transcurridos desde que Schneider y Mass informaron sobre sus descubrimientos, la atención se ha centrado de nuevo en estudios que aportan peso a la creciente cantidad de pruebas de que las variaciones de la actividad solar de un año a otro, así como el promedio a lo largo de un ciclo solar, producen realmente una apreciable influencia en el tiempo. En la mayor parte de los casos, estos efectos son demasiado pequeños para ser de interés en la vida cotidiana; no tendría sentido planear las vacaciones de acuerdo con la fase del ciclo de manchas solares, ya que otras influencias más importantes son capaces de destrozar cuidadosos planes. De todos modos, las fluctuaciones en pequeña escala de un año a otro ayudan a afianzar la realidad de la ligazón entre la Tierra y el Sol.

PATRONES Y PERIODICIDADES

En casi todo el mundo, las series de datos «climáticos» más largas de que se dispone para los análisis estadísticos usando modernas técnicas de procesado provienen de los anillos de los árboles. Sin embargo, sólo los anillos de ciertos árboles, en algunas partes del mundo, pueden servir para seguir el curso de las pasadas variaciones climáticas más allá del archivo histórico disponible. Los primeros estudios de esta clase se basaban en medidas del espesor de anillos individuales de árboles; los anillos más gruesos denotan años buenos para los árboles, un óptimo climático arbóreo. La pregunta es: ¿qué es un «buen» clima para un árbol? Para algunas especies, la lluvia es el factor clave, mientras que para otras lo es la temperatura. Y en ambos casos, la técnica adolecía de falta de precisión. Hoy día, los dendroclimatólogos tienen métodos más precisos para estimar temperaturas del pasado mediante una variante de la técnica de los isótopos del oxígeno que ha resultado de tanta utilidad para analizar muestras de capas de hielo. Las proporciones de isótopos tales como el oxígeno 16 y el oxígeno 18, y el hidrógeno y el deuterio, revelan la temperatura del agua absorbida por el árbol cada año, ya que las moléculas que contienen los isótopos más pesados se evaporan con mayor dificultad. Antes de ello, no obstante, los dendroclimatólogos tienen que demostrar que en los árboles vivientes los isótopos no emigran a través de los anillos, lo cual enmascararía el registro de temperaturas. Esto sólo se puede hacer calibrando los anillos más externos de los árboles vivientes de acuerdo con el archivo histórico de variaciones de temperatura: sólo entonces se pueden usar los anillos internos para hallar las variaciones de temperatura en el más remoto pasado. Y, entre otras cosas, esto significa desechar los datos de los famosos pinos de las White Mountains de California, donde no existen datos modernos fiables de las variaciones de temperatura que permitan calibrar los anillos de acuerdo con ellos.

Sin embargo, algunos árboles de Europa y Japón, en particular, han sido calibrados de forma adecuada y proporcionan

una buena guía de variaciones de temperatura a lo largo de los pasados 200 años, Si los anillos de los árboles han sido buenos termómetros durante 200 años, deberían serlo también para épocas más remotas. Los datos procedentes de una serie de cedros japoneses que cubren 2.000 años y de robles alemanes que se extienden a 1.000 años (en cada caso, reunidos a partir de diferentes segmentos de madera superpuestos) han sido analizados recientemente por Leona M. Libby y sus colaboradores de la University of California, en Los Ángeles, y, entre otras cosas, muestran un apreciable empeoramiento del clima a largo plazo, un enfriamiento de aproximadamente 1,6°C en el emplazamiento japonés de los últimos 2.000 años. Recordemos que un enfriamiento a largo plazo de unos 10°C restablecería las condiciones de una glaciación. No obstante, superpuestas a esta tendencia, hay fluctuaciones de temperatura de año en año, y una adaptación de las técnicas de procesado de señales que los ingenieros electrónicos y de comunicaciones utilizan para descifrar sus señales, revela tendencias significativas.

Para este análisis concreto, cada muestra de madera cubría cinco anillos, por lo que no había la menor esperanza de detectar la influencia de ninguno de los ciclos solares de 11 años. De todos modos, el equipo de Libby halló otras pautas que se han asociado también a la actividad solar, incluyendo un ciclo de 179 años, a lo largo del cual el propio ciclo de manchas solares parece reforzarse y debilitarse, así como otros períodos también conocidos a partir del ciclo de manchas solares. El ritmo de 11 años es solamente el rasgo más conspicuo de una compleja serie de variaciones de la actividad solar. Las mismas periodicidades se muestran en análisis de datos de isótopos en sedimentos del fondo de la cuenca de Santa Bárbara, mar adentro respecto a California: y en un estudio especial de una sucesión de 72 años de anillos de sequoia gigante, anillos lo bastante anchos como para ser analizados por separado, uno de los miembros del grupo de Libby halló el esperado ciclo de 11 años. Este estudio, sin embargo, no encontró otro ciclo que podría haber sido esperado.

Durante cada ciclo de 11 años de manchas solares, el Sol mantiene un campo magnético orientado en una dirección, como el campo magnético terrestre; pero, al final de este ciclo, el campo magnético del Sol se debilita hasta su anulación y después se refuerza en sentido opuesto, con los polos magnéticos norte y sur invertidos, a medida que se inicia el siguiente ciclo de manchas solares. Por consiguiente, hay un ciclo de variabilidad solar *magnética* de unos 22 años de duración, el «doble ciclo de manchas solares». Tal vez éste pudiera afectar también el clima de la Tierra, pero no hay evidencias de él en el archivo isotópico de los anillos de los árboles.

Esto tendría poco interés si no fuera por el hecho de que las sequías en el Medio Oeste norteamericano tienen lugar a intervalos recurrentes de unos 20 años, y se han sucedido así unas a otras por lo menos desde principios del siglo XIX. Algunos especialistas lo han «explicado» afirmando que el tiempo en las Grandes Llanuras responde al doble ciclo de manchas solares, aunque, siendo honrados, la correlación entre el ciclo de sequía y el ciclo magnético del Sol está lejos de ser perfecta. Los estudios de anillos arbóreos parece que descartan esta idea. Entonces ¿cómo se explica el ciclo de sequías? La mejor respuesta a esta pregunta provino, por casualidad, de un matemático que empleaba una técnica distinta para desenmarañar las relaciones entre el Sol y el tiempo.

¿UNA INFLUENCIA LUNAR?

Bob Currie, estadístico matemático, trabajaba recientemente en una importante compañía petrolífera estadounidense, en la que debería haberse dedicado al descubrimiento de nuevas reservas de crudos y gas (usando sus conocimientos estadísticos para interpretar las señales de ondas de choque obtenidas por los sismólogos que estudiaban la estructura geológica de la Tierra). Sin embargo, él prefirió concentrar sus esfuerzos en desenmarañar las pautas climáticas y prede-

cir futuras tendencias. Su compañía lo toleró durante algún tiempo, concediéndole incluso permiso para trabajar durante una temporada en el Goddard Space Flight Center de la NASA en Greenbelt, Maryland; pero en 1981 llegó un momento en el que Currie tuvo que decidir si abandonaba sus estudios climáticos y retornaba a sus deberes ordinarios, o bien si se marchaba. Eligió lo último a fin de dedicarse plenamente a hacer públicos sus temores de que una sequía de gran importancia, tal vez comparable a la de los años treinta, podría producirse en el Medio Oeste norteamericano en 1991.

Esta predicción no es la de un loco o la de un científico chiflado. Las impecables credenciales de Currie y el uso establecido de la técnica del proceso llamada análisis espectral de máxima entropía en trabajos prácticos, como la localización de depósitos de crudos, no permiten dudar de que las pautas que halla en el registro de temperaturas son reales. Muy pocas de esas pautas asombran a cualquiera que haya investigado el despliegue de la sucesión de eslabones entre la actividad solar y el tiempo. Lo sorprendente es que, en las manos de Currie, el análisis de máxima entropía es una poderosa herramienta que no necesita 2.000 años de anillos de árbol con los cuales operar, sino que puede hacerlo con las medidas directas de los datos meteorológicos, que se extienden sólo a un siglo o dos. El archivo histórico de las variaciones de temperatura y presión en Estados Unidos es suficiente para el trabajo de Currie, quien ha descubierto que la «señal» correspondiente al ciclo de 11 años está inequívocamente presente en los da tos de temperatura de las estaciones meteorológicas de Estados Unidos, pero únicamente en aquellas que se encuentran al este de las Montañas Rocosas y a latitudes más altas de unos 35°N. Cuando se promedian los datos de todas las estaciones meteorológicas de un lado a otro del continente, la señal solar queda enmascarada por otras variaciones, y ésta parece que es una de las razones por la cual no han aparecido en estudios estadísticos anteriores.

¿Por qué debe ser la región al este de las Montañas Rocosas y al norte de 35° tan susceptible a la influencia solar sobre el tiempo? Como Currie indica, el área afectada corresponde

exactamente a la región donde las trayectorias de las depresiones en el cinturón de vientos dominantes del oeste penetran a través del continente, es decir, la manifestación local de nuestro viejo amigo, el vórtice circumpolar. Lo que esta prueba nos dice realmente es que el vórtice circumpolar es afectado por variaciones en la actividad solar, incluso a lo largo de ciclos individuales de manchas solares. ¿Cuánto más susceptible podría ser el vórtice a un cambio en la actividad solar como el prolongado mínimo que duró más de medio siglo y «coincidió» con la pequeña glaciación? La detección por parte de Currie del pequeño efecto a corto plazo, sólo una variación de temperatura de 0,18°C en la región afectada a lo largo de un ciclo de actividad de manchas solares, apunta a variaciones mayores que afectarían a regiones más grandes en escalas de tiempo considerables. Hasta aquí, lo que Currie podría haber esperado hallar en su análisis del registro meteorológico: pero ciertamente no esperaba encontrar un ritmo de 18,5 años que afectara al tiempo del Medio Oeste norteamericano, sin corresponder a ningún ciclo solar. Por el contrario, este ritmo particular parece que concuerda con otro ritmo astronómico, el intervalo de 18,5 años entre máximas mareas inducidas en la atmósfera y en los océanos por la Luna, las mareas lunares nodales.

Las mareas máximas tienen lugar cuando la Tierra, la Luna y el Sol están *precisamente* en línea recta. Como la órbita de la Luna alrededor de la Tierra es un poco inclinada con respecto a la órbita de la Tierra en torno al Sol, las mareas máximas no se producen cada mes, sino cada 18,6 años. Esta alineación es también muy importante en el cálculo de eclipses, y por la misma razón: ello nos lleva a la fantástica especulación de que Stonehenge, monumento de 4.000 años de antigüedad en el sur de Inglaterra, el cual es ciertamente un buen pronosticador de eclipses, se podría usar, si nos diera por ahí, para predecir las variaciones del tiempo en el Medio Oeste norteamericano. Sin embargo. Currie ha efectuado una predicción mucho mejor mediante sus bastante más modernos computadores.

De nuevo, el efecto observado es pequeño, y asimismo la región afectada se encuentra viento abajo de las Montañas Rocosas en la corriente general de vientos del oeste. Currie sugiere que el efecto actúa porque el remolque de la Luna, producido con un insistente ritmo de 18.6 años, puede alterar el equilibrio del cinturón principal de vientos del oeste que se mueven hacia el norte o hacia el sur de las Montañas Rocosas, con profundos efectos sobre las lluvias en el este. Todavía no ha estudiado los detalles de este mecanismo, ni lo ha hecho ningún otro, y podría estar equivocado. Sin embargo, el motivo de su interés en las consecuencias del mecanismo mencionado estriba en la aparente concordancia entre el ciclo de 18,6 años recientemente descubierto en el tiempo y el ciclo de 20 años de las sequías en el Medio Oeste norteamericano. Este «ciclo de 20 años» encaja mucho mejor en el ritmo de 18,6 años que el doble ciclo solar de 22 años, como muestra la tabla 2. Desde 1801, la máxima sequía en el Medio Oeste norteamericano nunca ha estado desfasada más de dos años con respecto a la máxima marea lunar nodal, que se puede calcular exactamente a partir de los parámetros orbitales de la Luna. El doble ciclo de manchas solares concuerda casi igual de bien, pero con una importante serie de excepciones. En 1882 hubo una acusada sequía, precisamente siete años «antes» de lo que correspondía en relación con el doble ciclo de manchas solares: en 1900 se produjo una sequía a mitad del ciclo, a medio camino entre las dos sequías «pronosticadas», y en 1917, la sequía llegó con cuatro años «de retraso». Este es el tipo de comportamiento que podría esperarse si los ciclos de 22 años y de 18 años y pico casi concordaran fortuitamente durante el siglo XIX, quedaran desfasados a lo largo de dos ciclos hacia finales del siglo, y desde entonces hubieran vuelto casi a concordar durante cuatro ciclos más. Tratándose de ciclos tan largos, se tarda una gran parte de un siglo para que las diferencias sean apreciables; pero ahora el momento de la prueba está llegando. Si Currie tiene razón, y la marea lunar nodal proporciona el impulso para las sequías de las Grandes Llanuras, la próxima sequía debe producirse en 1991. Si la influencia del ciclo de manchas solares es real-

mente la fuerza impulsora, la sequía no comenzará hasta la segunda mitad de la década de 1990. En cualquier caso, el panorama es terrible si recordamos cuántas personas dependen ahora del grano americano cultivado en el Medio Oeste de Estados Unidos. Esa posibilidad, sin embargo, representa sólo una fluctuación relativamente poco importante y de corta duración. Todavía tenemos que explicar cómo la variación en el nivel de actividad solar puede, según parece, afectar el clima de la Tierra durante varios decenios, mediante cambios en la transparencia de la atmósfera.

Tabla 2 Sequías, manchas solares y ciclos lunares

Currie afirma que los años de maxima sequía en el Medio Oeste de Estados Unidos están relacionados con el ciclo de 18,6 años del máximo efecto lunar, si bien algunos años la sequía coincide con el doble ciclo de manchas solares «de 22 años».

Ciclo lunar	*Años de sequía*	*Ciclo de manchas solares*
1805	1801	1798
1824	1823	1823
1843	1845	1843
1861	1862	1867
1880	1882	1889
1899	1900	*
1917	1917	1913
1936	1935	1934
1954	1955	1953
1973	1975/76	1976
1991	?	¿1998?

* *No hay mínimo correspondiente*

Los datos de los años reales de sequía en el Medio Oeste norteamericano se ajustan más a los datos de las máximas mareas lunares nodales que a los del doble ciclo de manchas solares.

¿UN PAPEL PARA EL OZONO?

La cantidad de calor que llega a la superficie de la Tierra no sólo depende de la que alcanza la parte superior de la atmósfera, sino también de la transparencia —o transmisividad— de ésta. Aparte de las nubes y el polvo volcánico (del que se hablará en el capítulo 6), las propias moléculas de la

atmósfera absorben parte de la energía solar incidente. La estratosfera en particular absorbe energía mediante procesos fotoquímicos relacionados con el ozono. Esto la convierte en una capa de inversión, que aprisiona los sistemas meteorológicos del mundo de la troposfera que se encuentra debajo. Así pues, la influencia de la variabilidad solar en el tiempo reside no tanto en la cantidad de calor que llega a la cima de la atmósfera como en la cantidad de calor que atraviesa la estratosfera y alcanza la parte superior de la troposfera, o capa meteorológica. Y como la estratosfera es la capa de ozono, las variaciones en la concentración de éste podrían proporcionar una pista sobre los cambios en la transmisividad de la estratosfera.

La troposfera se extiende hasta unos 15 km sobre el nivel del mar, y la estratosfera, desde allí hasta unos 50 km. Así pues, incluso los globos meteorológicos de gran altitud, que llegan hasta 30 km. sólo penetran en una parte de la estratosfera. En años recientes se ha expresado cierta preocupación por el riesgo de que algunas actividades, entre ellas el vuelo de aviones reactores de gran altitud y el desprendimiento de clorofluorocarbonos por recipientes pulverizadores, pudieran destruir, o al menos dañar, la capa de ozono. Dado que la mayor parte de la radiación solar absorbida por ésta se encuentra en la región ultravioleta del espectro electromagnético, ello permitiría el paso de una mayor cantidad de radiación ultravioleta hasta la superficie de la Tierra, donde podría perjudicar a los seres vivos. Cualesquiera que fuesen los pros y contras de la discusión, está ahora claro que las va naciones naturales de la concentración de ozono en la estratosfera a lo largo del ciclo solar y en escalas de tiempo más cortas, son mucho mayores que cualquier influencia probable debida a la actividad humana, y que esas fluctuaciones naturales pueden en parte explicar las variaciones en la cantidad de calor que llega hasta la troposfera.

Un estudio clave, publicado en 1976 por Ronald Angione y sus colaboradores, se basaba en medidas de la radiación solar que alcanza el suelo a diferentes longitudes de onda, en puntos del sur de California y el norte de Chile, durante la

primera mitad del presente siglo. Como la capa de ozono absorbe la radiación ultravioleta, la cantidad de rayos ultravioleta que llegan al suelo constituye una buena medida de la concentración de ozono presente en la estratosfera. Las variaciones de temperatura en esta capa atmosférica afectan también la absorción de radiación en una gran parte del espectro electromagnético, lo cual complica la cuestión. Sin embargo, en una banda entre las longitudes de onda de 0,5 y 0,7 micras, llamada banda de Chappuis, el efecto de temperatura resulta pequeño y puede despreciarse. Los datos estudiados por el equipo de Angione —originalmente obtenidos en el Smithsonian Astrophysical Observatory— proporcionan una clara e impresionante indicación de las variaciones en la capa de ozono durante el presente siglo. En ambos lugares, las concentraciones totales de ozono indicadas por la intensidad de radiación medida en la banda de Chappuis varían hasta un 20-30% de mes en mes, de año en año y de una década a otra. La absorción en la propia banda de Chappuis responde de casi un 2% de la energía total que, emitida por el Sol, llega a la estratosfera, de modo que las medidas de variabilidad pueden por sí solas, dar cuenta de las fluctuaciones en la cantidad de energía solar que llega al suelo —o a la troposfera— hasta en un 0,5% (25% del 2%). Esto no basta para explicar la diferencia entre las condiciones actuales y, por ejemplo, las de la «pequeña glaciación», pero el descubrimiento destaca la distinción entre la cantidad de energía solar que llega a la cima de la atmósfera —la constante solar astronómica— y la cantidad que alcanza la troposfera, o constante solar meteorológica. El paso siguiente para determinar la relación entre el Sol y el tiempo consiste en hallar una razón para esas fluctuaciones del ozono y en identificar en la estratosfera otras reacciones fotoquímicas que absorban energía solar incidente. Con uno de los imprevisibles giros que parece que son característicos del estudio del clima, y con los cuales ya deberíamos estar familiarizados, la respuesta al rompecabezas ha procedido no de un estudio de la influencia solar sobre el tiempo, sino del efecto sobre la estratosfera de pruebas nucleares en la atmósfera.

EL ESLABÓN PERDIDO

Algunas de las medidas que constituyeron la base de los cálculos efectuados por Schneider y Mass en su estudio de variaciones climáticas desde la «pequeña glaciación» procedían de dos investigadores soviéticos. K. Y Kondratyev, del Observatorio Geofísico Principal de Leningrado, y G. A Nikolsky, de la Universidad de Leningrado. Su información, proveniente de vuelos con globos de gran altitud llevados a cabo en la década de 1960, mostró un aumento de la cantidad de energía del Sol, o constante solar meteorológica, que coincidía con el período de creciente actividad del Sol durante ese ciclo solar, de 1964 a 1969. Dichos investigadores interpretaron esto como prueba de que la cantidad de calor emitida por el Sol variaba en un 2% a lo largo del ciclo solar. Sin embargo, en 1979. los meteorólogos occidentales quedaron sorprendidos por una nueva afirmación de Kondratyev y Nikolsky, quienes sostenían que las pruebas de armas nucleares realizadas en las décadas de 1950 y 1960 habían provocado un notable efecto sobre la estratosfera y sobre el tiempo meteorológico en el mundo, dando lugar a los rigurosos inviernos de 1962-63 y 1963-64. Los cambios apreciados en el calor solar después de 1964 —argüían dichos investigadores— eran debidos a la lenta recuperación de la estratosfera, que tendía a la normalidad tras los daños causados en ella por las pruebas atómicas, y estos cambios proporcionaban una importante indicación de cómo la actividad solar puede también destrozar la capa de ozono, explicando el nexo entre la actividad solar y el tiempo.

Cuando publiqué esta interpretación en el *New Scientist*, hallé una cortés incredulidad entre los meteorólogos. Sin embargo, dicho artículo me llevó también a mantener una larga correspondencia con Kondratyev y Nikolsky, quienes me proporcionaron una detallada relación de su trabajo, que en aquella época (a mediados de 1981) todavía no se había publicado en inglés. Partiendo de la posible influencia antropogénica en el tiempo por medio del efecto sobre la estratosfera de las pruebas nucleares, este nuevo trabajo científico

propone la idea de que un efecto muy semejante, relacionado con la variación de intensidad de los rayos cósmicos que penetran en la atmósfera, proporcionaría el mecanismo, largo tiempo buscado, que explicase cómo el ciclo solar de actividad de aproximadamente 11 años, al igual que los períodos más largos del Sol tranquilo como los de finales del siglo XVII, podrían influir sobre el tiempo en la Tierra. Este trabajo aún no ha pasado el cedazo usual de censura científica y publicación formal en revistas especializadas: todavía ha de pulirse y sólo se puede tomar como un esbozo del *posible* funcionamiento del mecanismo. Aun así, es lo bastante importante como para hacerle mención aquí, teniendo en cuenta que los detalles, al menos, pueden variar como resultado de las discusiones que seguramente tendrán lugar entre los científicos cuando el trabajo se publique.

Se puede sacar una idea de la complejidad del proceso a partir de la forma en que varió la concentración del ozono en la estratosfera durante los años sesenta, cuando la constante solar meteorológica estaba aumentando. La concentración total de ozono en la vertical de algunas estaciones de observación norteamericanas aumentó entre el 4 y el 8% durante la década de 1960, y desde entonces ha descendido ligeramente, como Linwood B. Callis y sus colaboradores del Langley Research Center de la NASA informaron en *Science* en 1979. El equipo de Langley interpretó este hecho como debido a variaciones en la radiación ultravioleta del Sol, es decir, la posibilidad de que la calidad de los rayos solares (en cierto sentido, su color), más que su cantidad, variase en el curso del ciclo solar. Las variaciones, sin embargo, encajan bastante bien en el esquema propuesto por los investigadores rusos, siempre que sea posible explicar cómo el *aumento* de la cantidad de ozono puede vincularse a un incremento del calor solar que llega al suelo a través de la atmósfera. Lejos de que la absorción en las bandas de Chappuis responda de todo ello, parece más bien que su efecto sea sobradamente compensado por algún otro que interviene en sentido contrario.

La explicación es sencilla. Aparte de la radiación ultravioleta absorbida por el propio ozono, se produce absorción de

energía solar a distintas longitudes de onda durante las reacciones fotoquímicas que eliminan el ozono. Si se inunda la estratosfera con ciertos compuestos moleculares, éstos absorben energía solar y destruyen ozono: la Tierra se enfría mientras que la concentración de ozono en la estratosfera se reduce. Cuando las moléculas contaminantes desaparecen, el suelo se calienta en tanto que la estratosfera se recupera: exactamente lo que se observó en la década de 1960. ¿Cuáles son las moléculas contaminantes más probables? Debido al temor suscitado acerca de la influencia de los productos expulsados por los reactores de alta cota, se hicieron muchos cálculos durante los años setenta sobre los efectos de los óxidos de nitrógeno, designados en conjunto NO_X, en la estratosfera. Cumplen exactamente las condiciones, y son producidos en copiosas cantidades por la bola de fuego atómica de una explosión nuclear, la cual se eleva hasta gran altura en la atmósfera y esparce sus óxidos de nitrógeno contaminantes, generados cuando el nitrógeno atmosférico y el oxígeno se combinan a las elevadas temperaturas de la bola de fuego. La idea de los rusos no es tan disparatada como pueda parecer a primera vista: aquellos relatos que atribuían el mal tiempo a «la bomba» podrían tener, después de todo, algo de verdad.

UNA SORPRESA ATÓMICA

La bola de fuego de una explosión nuclear en la atmósfera alcanza una altura de 30-45 km sobre el nivel del suelo. Por cada megatón (Mt, millón de toneladas) equivalente de TNT (trinitrotolueno: trilita) de la explosión, se producen unas 3.000 toneladas de NO_X, es decir, unas 10^{32} (la unidad seguida de 32 ceros) moléculas. En su prisa por hacer explotar tantas bombas como se pudiera hasta la puesta en vigor del tratado de prohibición parcial de 1963, las superpotencias detonaron el equivalente acumulado de 340 Mt de explosiones nucleares en un par de años, liberando en la estratosfera 1,5 Mt de NO_X, que se dispersó a una altura comprendida entre 20 y 50 km. Tomando un componente típico de la fami-

lia de los óxidos, el NO_2 (dióxido de nitrógeno), la vida media de las moléculas de cada explosión de la estratosfera es de unos cuatro años, de modo que, además de este brote de producción de NO_X en 1963, la estratosfera todavía arrastraba una carga de contaminación de las pruebas atómicas que habían tenido lugar durante los años cincuenta. En conjunto, según los cálculos de Kondratyev y Nikolsky, a comienzos de 1963 había en la estratosfera una concentración de NO_X equivalente a la explosión de 980 Mt. Suponiendo que toda esta contaminación se hubiera difundido en un anillo de la estratosfera entre las latitudes 25 y 85°N. concluyeron que cada centímetro cuadrado del globo debajo de ese anillo tenía una carga de 10^{17} (la unidad seguida de 17 ceros) moléculas de NO_X por encima de él, lo que es suficiente para reducir el flujo de radiación solar a las altitudes de los globos —coincidentes más o menos con la cima de la troposfera— en un 2,5%. Esto concuerda con las medidas de radiación solar obtenidas por los globos en la década de 1960.

Concuerda también muy bien con las características del tiempo en el hemisferio norte a principios de dicha década. Entre 1958 y 1964, el hemisferio norte exterior a la zona tropical —muy aproximadamente la región localizada debajo de la nube de contaminación nuclear— se enfrió casi medio grado. El invierno de 1962-63 se recuerda como muy frío en Europa, y aunque el de 1963-64 fue menos riguroso cerca de los centros de población, y por consiguiente no es tan memorable, considerando el hemisferio en su totalidad resultó todavía más frío que el anterior. «A partir de 1963», dice el equipo soviético, «la frecuencia de anomalías negativas de temperatura aumentó en todo el globo. Los máximos valores de la caída de temperatura se registraron en 1964. 1965 y 1966». Sin embargo, mientras la Tierra se enfriaba al nivel del suelo y en toda la troposfera, la estratosfera se calentó. Cohetes provistos de instrumentos pusieron de manifiesto que. En la zona ecuatorial de la estratosfera media, la temperatura en 1963-1964 excedió al promedio de 12 años en no menos de 6°C Durante los años siguientes, las temperaturas de la estratosfera bajaron en todas las latitudes en la zona comprendida

entre 46 y 55 km de altura y, a un ritmo más gradual, en altitudes entre 16 y 45 km. El aumento de temperatura de la estratósfera indica que absorbe una mayor cantidad de la energía solar inciden te: la estratosfera caliente es una causa directa de la troposfera fría, ya que aprisiona calor que de otro modo pasaría a través de sí misma para calentar el suelo.

De 1963 a 1967, la estratosfera se descontaminó lentamente tras el aumento de concentración de NO_X debido a casi veinte años de explosiones nucleares en la atmósfera. Sin embargo, entre 1967 y 1970, una nueva serie de pruebas de bombas efectuadas por los franceses y los chinos retrasaron el retorno a las condiciones normales, lo cual se refleja en la cambiante concentración de ozono registrada por estaciones de observación alrededor del mundo, entre ellas las mencionadas por Callis y sus colaboradores. En definitiva, las indicaciones a favor de la idea de una conexión entre las pruebas nucleares y las variaciones meteorológicas son demasiado significativas para no tenerlas en cuenta; no obstante, Kondratyev y Nikolsky son los primeros en señalar que otros efectos pueden también haber tenido gran importancia en la configuración de las características del tiempo durante los últimos años.

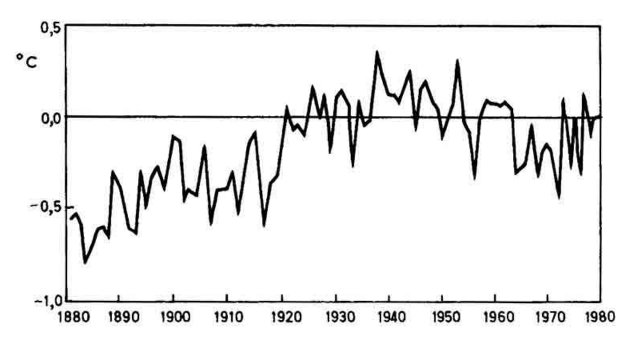


Fig. 5-3. La pauta de variaciones de temperatura en el hemisferio norte a lo largo de los últimos cien años, medida en forma de desviaciones anuales respecto a un valor arbitrario. ¿Hubo alguna relación entre el mínimo de temperaturas de los años sesenta y las pruebas de armas nucleares en la atmósfera?

En el capítulo 6 se tratarán con mayor detalle los efectos del polvo y otros materiales producidos por las erupciones volcánicas sobre el tiempo y el clima. Pero no es necesario ser un genio para darse cuenta de que el polvo que llega a la estratosfera, cualquiera que sea su fuente, podría también absorber parte de la radiación solar incidente, calentando la estratósfera y enfriando la Tierra. Tuvo lugar una importante erupción volcánica, la del monte Agung en Bali, el 30 de marzo de 1963, a la cual se ha echado generalmente la culpa de los cambios climáticos ocurridos en los años sesenta; sin embargo, los autores rusos argumentan que, puesto que Bali se halla al sur del ecuador (a 8°S) y la erupción se produjo a finales del invierno del hemisferio norte, la configuración de la circulación atmosférica no podría haber transportado más del 15% del polvo que arrojó a la estratosfera al norte del ecuador meteorológico. Tomando esto en consideración, arguyen que la erupción del monte Agung sólo puede responder de la mitad del enfriamiento observado a principios de los años sesenta, enfriamiento que, en cualquier caso, había comenzado ya antes de la erupción del volcán. Según su argumento, los dos efectos sobre el NO_X, el volcánico y el de las bombas, «contribuyeron casi por igual» a la variación de intensidad de la radiación solar que alcanza la troposfera y, «al parecer, produjeron consecuencias climáticas similares». Esta es una cuestión que tal vez sea mejor dejar a los expertos. No obstante, la extensión de su propia teoría por parte de Kondratyev y Nikolsky para explicar las relaciones entre la actividad solar y el tiempo, nos lleva de nuevo al tema principal del presente capítulo.

EL NEXO CON EL COSMOS

La idea básica, al parecer, es que cualquiera que sea lo que el hombre haya, la naturaleza lo sabe hacer mejor. Las moléculas de los óxidos de nitrógeno se producen naturalmente en la atmósfera como resultado de interacciones en que participan los rayos cósmicos, entre ellos aquellas partículas carga-

das emitidas por el Sol que provocan las auroras, destrozan el campo magnético y, mediante algún proceso desconocido, estimulan el desarrollo de depresiones en algunas latitudes. Cuantos más rayos cósmicos haya, tanto más NO_X y tanto menos ozono resultan. Cuando la intensidad de rayos cósmicos aumenta, la estratosfera se calienta mientras que la troposfera por debajo de ella, donde nosotros vivimos, se enfría. Como el Sol produce una mayor cantidad de partículas —rayos cósmicos solares— cuando es más activo, podría concluirse que un *aumento* de la actividad solar debe llevar siempre a una *disminución* de la temperatura en la superficie terrestre. Pero las cosas no son tan sencillas No obstante, antes de entrar de lleno en materia, demos una ojeada, aunque sea un poco superficial, al tamaño de las fuerzas actuantes.

Paul Crutzen, G. C. Reid y sus colaboradores, en Boulder, Colorado. (EE.UU). realizaron algunos cálculos en relación con estas ideas a mediados de los años setenta. Revelaron que después de una gran fulguración solar, llamada «suceso de protones solares», se genera en la estratosfera a altas latitudes (por encima de 60°) tanto NO_X como el que produce una explosión nuclear de 50 Mt. En esa época, el equipo de Boulder estaba muy interesado en las consecuencias que tales cambios en la estratosfera tienen sobre la vida en la Tierra. Una fulguración solar mayor de lo normal, especialmente si ocurriera durante una época en que el campo magnético terrestre fuera relativamente débil y su efecto protector reducido, podría destruir tanto ozono que la radiación ultravioleta inundaría la troposfera casi sin obstáculo. En tal caso, cantidades de plantas desaparecerían, y los animales que se alimentan de ellas morirían de hambre. El archivo fósil pone de manifiesto que en ocasiones se han producido tales «extinciones en masa»; ¿podrían ser debidas éstas a una combinación de un campo magnético terrestre débil y un brote superintenso de actividad solar? Sea o no correcta esta especulación, no hay nada especulativo acerca del cálculo de que un raro —pero en absoluto único— suceso de protones solares equivalente, en términos de su efecto sobre la estratosfera, a una bomba de hidrógeno de 50 Mt. aumentaría la concentración

de NO_X dos o tres veces por encima de su nivel natural, haría disminuir la concentración de ozono a altas latitudes en un 25% y produciría efectos que durarían al menos dos años antes que la atmósfera se recuperase. Cuando el Sol se encuentra en un período de gran actividad y se producen intensos brotes de protones solares, el efecto debe de dar lugar a un enfriamiento de la troposfera; pero cuando el Sol está tranquilo o sólo moderadamente activo, hay que considerar también otro factor.

Aparte de la variable actividad solar, el Sistema Solar. Tierra incluida, está bañado por una corriente de fondo, más o menos continua, de partículas cósmicas procedentes de la Galaxia en general. Estos rayos cósmicos galácticos (RCG) equivalen, en cuanto a su efecto sobre la estratosfera, a aproximadamente la mitad de la influencia de un suceso importante de protones solares: sin embargo, su efecto, a diferencia del de una fulguración solar, no es transitorio, sino que está siempre presente. Además, los rayos cósmicos galácticos interaccionan con la atmósfera de forma distinta a como lo hacen los rayos cósmicos solares (RCS).

Los RCS llegan sólo a altas latitudes, guiados por la forma del campo magnético terrestre, y son absorbidos a altas latitudes en la estratosfera. Los RCG atraviesan el escudo protector del campo magnético y la atmósfera con mayor facilidad, de modo que son absorbidos en la baja atmósfera a alturas entre 11 y 15 km. Asimismo, aun cuando su intensidad en la banda de latitud de 50°N a 50°S es sólo algo mayor de la mitad de la intensidad a altas latitudes, penetran en la región ecuatorial, donde los rayos cósmicos solares brillan por su ausencia.

Así pues, el efecto total de los rayos cósmicos sobre la estratosfera depende de la influencia combinada de los RCS y los RCG. Cuando el Sol está tranquilo, dominan los rayos cósmicos galácticos, se produce NO_X y se dispersa por la estratosfera, y la Tierra por debajo de ella se enfría mientras que la estratosfera se calienta. Al aumentar la actividad solar, dado que el campo magnético terrestre constituye un buen escudo contra los rayos cósmicos solares, el primer efecto apreciable es que el viento solar, que sopla desde el Sol con

mayor intensidad, desvía los rayos cósmicos galácticos y protege a la Tierra de su influencia. Como resultado, se produce menos NO_X, y la estratosfera se enfría en tanto que la troposfera se calienta. Si la actividad solar sigue incrementándose, sin embargo, los rayos cósmicos solares producidos en las mayores fulguraciones son lo bastante potentes como para penetrar realmente en la estratosfera, aumentando de nuevo la concentración de NO_X y causando enfriamiento en la superficie terrestre.

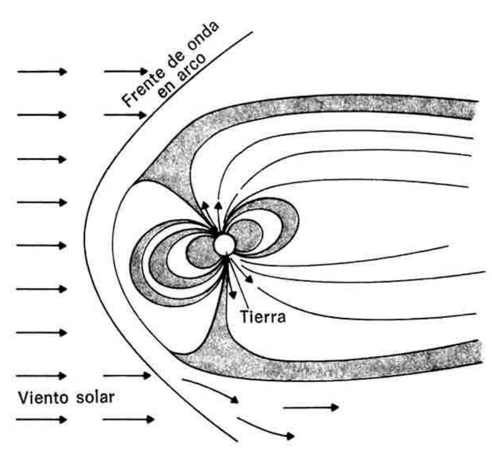


Fig. 5-4. La Tierra y su campo magnético están inmersos en la corriente de partículas que «soplan» desde el Sol. Un viento solar fuerte protege la Tierra de los rayos cósmicos de más allá del Sistema Solar, pero un viento solar muy intenso produce su propia distorsión, ya que las partículas son conducidas hacia los polos a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético.

Esto es precisamente lo que el equipo ruso descubrió, y tuvo cierta dificultad para explicar, en su análisis original de los datos de vuelos de globos en 1970. La constante solar meteorológica, o cantidad de energía procedente del Sol que alcanza la tropopausa, aumenta cuando lo hace la actividad solar, medida por el número de manchas solares. Sin embargo, para números de manchas solares superiores a 70, el aumento se detiene y para números de manchas solares todavía mayores, la situación se invierte, de modo que para números

muy altos, hasta 200 más o menos, la constante solar meteorológica es la misma que para números muy bajos de manchas solares. El efecto es como si la temperatura del Sol aumentase primero con el número de manchas y después decreciese, en cuantía de aproximadamente un 2%. En realidad, la causa es la variable transparencia de la estratosfera debida a las interacciones con los rayos cósmicos.

¿Por qué se ha tardado tanto en notar el efecto? ¿Por qué, de hecho, no es obvio para nosotros desde el suelo que la constante solar meteorológica varia cuando lo hace el número de manchas solares? Una razón es que el Sol no siempre alcanza los mismos niveles de actividad en cada ciclo solar. Un ciclo puede alcanzar su máximo a números de manchas solares de 180 más o menos, presentando el cuadro completo de comportamiento aquí esbozado. Otro ciclo puede alcanzar un número máximo de manchas solares de sólo 50 o 60, produciendo lo que parece a primera vista un cuadro muy diferente de variaciones de temperatura en la Tierra a lo largo de un ciclo de 11 años. Y, además, la máquina atmosférica no puede realmente responder a esos cambios de año en año. Cuando la cantidad de energía incidente aumenta, su efecto climático más importante es calentar ligeramente la superficie de los océanos: pero se tarda años en que dicho calentamiento produzca un efecto apreciable, y transcurridos unos cinco años, el efecto solar estará ya de nuevo operando en otra dirección. Los océanos actúan como un amortiguador, suavizando cualquier influencia a corto plazo sobre el clima, de modo que, ciertamente, sólo podremos hallar promedios a más largo plazo, sobre uno o varios ciclos solares. De ahí que el frío de la «pequeña glaciación» se destaque tan claramente como un indicador de la relación entre el Sol y el tiempo; hacia mediados del siglo XX, el Sol ha mostrado mucha más actividad, y el efecto total ha sido protegernos de los rayos cósmicos galácticos y permitir un ligero calentamiento global en comparación con el siglo XIX. ¿Hacia qué lado se inclinará en el futuro próximo? Aquí entramos realmente en el campo de la especulación. La persona que mejor ha interpretado la relación Sol/tiempo en los últimos treinta años es Hurd C. Willett,

del Institute of Technology de Massachusetts (EE.UU.). Tiene un pasado brillante; pero hace unas predicciones sombrías para la década de 1980 y años sucesivos.

OTRA PREDICCIÓN ESCALOFRIANTE

Willett utilizaba las pruebas de una relación entre la actividad solar y el tiempo para pronosticar cambios climáticos mucho antes que nadie hubiera elaborado un mecanismo plausible para la relación Sol/tiempo. Durante la mayor parte de los últimos treinta años, sus predicciones han ido contra corriente respecto a los conocimientos de la época; pero, invariablemente, han demostrado que son correctas. Como todos los buenos estudios de fluctuaciones climáticas a largo plazo, su trabajo se basa en los corrimientos hacia el norte y hacia el sur de los vientos zonales que barren el globo a latitudes templadas, corrimientos que, para simplificar, se puede considerar que producen un estado zonal a latitudes altas (ZLA) o un estado zonal a latitudes bajas (ZLB). Cuanto más se desvía la configuración circulatoria hacia uno de esos estados idealizados, tanto más se aparta el tiempo de lo que tenemos por tiempo «normal». Una circulación ZLB pronunciada corresponde a condiciones frías y lluviosas, y «coincide» con períodos de reducida actividad de manchas solares, como la «pequeña glaciación», mientras que la circulación ZLA es portadora de tiempo más cálido y seco en Estados Unidos y Europa, y está históricamente relacionada con decenios en que la actividad solar mostró en conjunto niveles moderados.

Los críticos del enfoque de Willett respecto a la predicción a largo plazo no han tardado en rechazar todo esto como coincidencia. Y es cierto que sólo dispone de 250 años de datos realmente fiables acerca de las manchas solares sobre los cuales basar sus cálculos. No obstante, las pruebas a favor de una relación Sol/tiempo son ahora más seguras que nunca, y echan abajo la principal fuerza de los argumentos de los críticos. Aun así, se necesita un alto grado de audacia científica para utilizar, como Willett, 250 años de datos y salir con la

idea de que el ciclo básico solar de 11 años es a su vez modulado por dos grandes ciclos de 80 y 100 años de duración, que siguen uno al otro y juntos dan un aspecto de un ciclo de 180 años. El hecho es que las técnicas de análisis espectral de máxima entropía, como las usadas por Bob Currie, han detectado hace pocos años esos ciclos a largo plazo, proporcionando así base estadística a la interpretación intuitiva de los datos que hacía Willett. Éste ha alcanzado notable éxito con las predicciones resultantes. Pero existe una dificultad.

Hablemos primero de los éxitos. En 1951, cuando la mayoría de sus colegas estaban preocupados por el calentamiento global, entonces recientemente detectado, en la primera ola de inquietud acerca del efecto invernadero. Willett predijo un apreciable descenso de la temperatura a lo largo de los 15 años siguientes hasta 1965. En 1955 predijo que la creciente frecuencia de huracanes que en aquella época era causa de ansiedad había ya alcanzado su máximo, de modo que no se repetiría en la década de 1960, y que la sequía que amenazaba las Grandes Llanuras de Estados Unidos estaba a punto de terminar. De nuevo estuvo en lo cierto, como lo estuvo también en otras predicciones para los años setenta. Todas esas predicciones se basaban en las pautas de variación de las manchas solares de 80 y de 100 años, junto con ciertas reglas entonces *ad hoc*, sobre la relación entre el Sol y el tiempo, obtenidas más o menos por experiencia práctica. Sin embargo, la pauta utilizada por Willett se desbarató en 1980, cuando, al parecer, el Sol cambió de marcha. En cierto sentido, esto es una mala noticia; pero, en otro, es un regalo. Willett ha hecho predicciones para la próxima década, suponiendo que todavía se sucederán los ritmos de 80 y 100 años. Si se cumplen las predicciones pero el comportamiento del Sol no va acompasado, se demostraría que Willett simplemente tuvo suerte antes y que el efecto del Sol es mucho menor de lo que él suponía. Por el contrario, si el Sol y el tiempo van al unísono, aun cuando haya cambiado el ritmo de 180 años, ello confirmará la validez de la relación Sol/tiempo. Ninguna de las predicciones, en realidad, es muy alentadora.

A mediados de los años setenta, Willett presentó sus predicciones para las décadas siguientes en la hipótesis de que el ritmo de 180 años se mantendría como antes. Pronosticó años de baja actividad solar hacia finales del siglo XX, un período reminiscente de la primera mitad del siglo XIX, una época de bajos números de manchas solares (véase fig. SI) y la última gran ola (hasta ahora) de la «pequeña glaciación». La predicción para las décadas de 1980 y 1990 era de una intensificación de la pauta ZLB, con tiempo frío y lluvioso sobre las latitudes medias, incluyendo Estados Unidos y Europa.

Sin embargo, el Sol se negó a jugar. Por el contrario, el período 1979-1980 fue testigo de un máximo muy alto de actividad de manchas solares, sin parangón en los últimos 180 o 360 años; se dieron números de manchas solares del orden de 180 en el otoño de 1979, descendieron después un poco y volvieron de nuevo a subir hasta 179 en mayor de 1980, manteniéndose todavía hacia 150 en abril de 1981. El número medio provisional de manchas solares correspondiente al año 1980, emitido por el Centro de Datos de índice de Manchas Solares en Bruselas en la primavera de 1981, era de 155, mayor que el valor más alto (105) alcanzado en el máximo anterior de 1968-69 y no lejos de la marca absoluta (190) alcanzada en 1957 («absoluta» significa aquí «durante los últimos 300 años»). Willett supone ahora que, por razones desconocidas, el Sol puede estar retornando a un estado de gran actividad general, que en el pasado ha sido típico de la segunda mitad de cada uno de los dos ciclos conocidos de «100 años», en lugar de mantenerse en el bajo nivel de actividad «apropiado» al comienzo de un nuevo ciclo «de 80 años». Si el Sol permanece activo. Willett espera que la circulación ZLB fría se mantendrá durante gran parte de los años ochenta, ya que los sistemas meteorológicos van retrasados con respecto a las variaciones solares, pero que en la década de 1990 se apreciará un retorno a condiciones más cálidas y secas. Si el ciclo de manchas solares «se escapa por una nueva tangente», dice Willett, entonces «se habrá perdido la base de las predicciones climáticas a largo plazo». Pero «al menos, si la pauta de cambio climático observada corresponde a la nueva se-

cuencia de cambios solares de la misma manera que en el pasado, la hipótesis del control solar del clima quedará comprobada».

A la luz del reciente trabajo de Currie, Kondratyev y Nikolsky, de los investigadores de anillos de árboles y de otros, será realmente sorprendente si las pautas de variaciones climáticas y de variabilidad solar van desde ahora cada una por su lado después de haber ido acompasadas desde la «pequeña glaciación». Teniendo todo esto en cuenta, sin embargo, los detallados pronósticos de Willett han de ser tratados con precaución. La mejor guía para el tiempo futuro que podemos obtener de las relaciones con el Sol resulta de tomar una perspectiva a plazo algo más largo. En comparación con los siglos recientes, el Sol ha estado desacostumbradamente activo a mediados del siglo XX, lo cual ha contribuido a las condiciones cálidas del pasado más reciente. A menos que dentro del Sol esté teniendo lugar un cambio real y fundamental —en cuyo caso sobran las apuestas— la predicción más probable para las próximas décadas del siglo es de un retorno a la normalidad, con menos manchas solares, incluso en los años de máximo, que las observadas en los últimos decenios, y un enfriamiento global asociado. El mismo enfoque de sentido común que hemos aplicado al archivo histórico —esperar lo que ya hemos tenido antes— nos da, cuando se aplica a la relación con el Sol, la misma y nada grata predicción: lo normal es un mundo más frío que aquel al que estamos acostumbrados. Y no parece que el efecto del polvo volcánico vaya a cambiar mucho la predicción.

VI. FUEGO Y HIELO

Probablemente, la primera persona que sospechó la existencia de una relación entre las erupciones volcánicas y el clima fue el polígrafo norteamericano Benjamín Franklin. En 1784 vivía en París como primer representante diplomático y plenipotenciario de los recién formados Estados Unidos de América, y escribió:

«Durante varios de los meses de verano del año 1783, cuando los efectos caloríficos de los rayos del Sol en estas regiones septentrionales deberían de haber sido máximos, había una constante niebla sobre toda Europa y una gran parte de Norteamérica. Esta niebla era de naturaleza permanente; era seca, y parecía que los rayos del Sol no tenían poder para disiparla, como fácilmente hacen con una niebla húmeda... De hecho, se volvían tan débiles al pasar a través de ella que, cuando se recogían en el foco de una lente, difícilmente quemaban un papel. Por supuesto, su efecto estival de calentamiento de la Tierra disminuyó en gran manera.

«De aquí que la superficie pronto se helara...

«...que las primeras nieves permanecieran sobre ella sin fundirse...

«...que el invierno de 1783-84 fuera tal vez más riguroso que ninguno de los que se habían dado en muchos años.

«La causa de esta niebla universal no se conoce todavía. Podría ser adventicia a la Tierra, y meramente un humo procedente de la combustión por el fuego... o podría ser la vasta humareda que durante largo tiempo continuó saliendo en verano del Hekla, en Islandia, y de ese otro volcán surgido del mar cerca de la isla, cuyo humo pudo ser dispersado por diversos vientos sobre la parte septentrional del mundo...

«Sin embargo, parece que vale la pena investigar si otros duros inviernos, registrados en la historia, fueron precedidos de nieblas de verano semejantes y ampliamente extendidas…».[3]

[3] Cita de la carta de Franklin en Hubert H. Lamb, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. A266 (1970). págs. 425-533.

Preocupado por las erupciones de Islandia Con 200 años de observaciones desde entonces, tanto de volcanes como de tiempo, la correlación es lo bastante clara, aunque los volcanes por sí solos no pueden explicar los cambios del clima. Y la propuesta de Franklin de estudiar los archivos históricos para comprobar la relación entre las erupciones volcánicas y los cambios climáticos se hizo realidad recientemente, en 1970, con una vasta exploración histórica llevada a cabo por Hubert Lamb, quien entonces trabajaba en el Servicio Meteorológico británico. La meticulosa compilación de Lamb registra todas las erupciones volcánicas desde 1500 hasta la década de 1960, y relaciona su impacto sobre la atmósfera de la Tierra con una escala establecida que define la erupción del Krakatoa de 1883 como 1.000 unidades de un «índice de velo de polvo».

Entre las especulaciones de Benjamín Franklin y el índice de velo de polvo de Hubert Lamb, sin embargo, se sucedieron varias generaciones de especulación científica y preocupación lega sobre los efectos de los volcanes sobre el tiempo. El primer hito del siglo XIX fue la erupción del Tambora, en Indonesia, en 1815. Sabemos ahora, a partir de las pruebas históricas y geológicas, que este volcán arrojó a la atmósfera tres veces la cantidad de polvo que lanzó el Krakatoa siete décadas más tarde, pero las comunicaciones eran deficientes a principios del siglo XIX: Europa estaba más interesada en la derrota de Napoleón que en los desastres naturales que se producían al otro lado del mundo, y no había un Benjamín Franklin que estableciese un nexo entre la erupción de Indonesia y el terrible verano que sufrieron Europa y Norteamérica en 1816. Este nexo, ahora bien establecido, es el punto de partida de un gran volumen de trabajo actual, que incluye los estudios de Reid Bryson publicados en *Climates of Hunger* (Climas de hambre). Con anterioridad a la erupción del Tambora habían tenido lugar una serie de erupciones menores alrededor del globo entre 1811 y 1813, de modo que la alta atmósfera —la estratosfera— estaba ya cargada de polvo antes que el volcán indonesio estallase. El efecto acumulado hizo que 1816 se conociera en Europa como «el año sin ve-

rano», mientras que los pioneros americanos, más prosaicos, lo describieron como «mil ochocientos y morir-de-hambre». En todas las latitudes medias del hemisferio norte, las temperaturas fueron aproximadamente 1°C más bajas que la media de muchos años en aquella época, y los datos de algunas regiones de Inglaterra indican una temperatura media de verano de 3°C por debajo de la normal. Al otro lado del Atlántico. Nueva Inglaterra y la parte oriental de Canadá sufrieron igual rigor meteorológico, con nevadas sobre una extensa zona en junio de 1816 y con escarchas durante todos los meses del año. Las cosechas se perdieron a ambos lados del Atlántico, los irlandeses lo pasaron muy mal, y hubo disturbios por falta de alimentos en Gales. Todo ello pone de manifiesto no sólo la sensibilidad de la máquina atmosférica a las erupciones volcánicas, sino también la influencia en la agricultura de un descenso de las temperaturas estivales de un par de grados. Los inviernos rigurosos traen consigo sus propios problemas, pero no destruyen cosechas: en cambio, los veranos fríos pueden producir un caos en los mercados mundiales de alimentos. Las consecuencias actuales de una erupción como la del Tambora serían mucho más graves que los estragos sufridos por el mundo en 1816; y la erupción del monte St. Helens de 1980 (de la que se hablará en breve) estuvo a punto de producir otro «año sin verano».

Por impresionantes que sean los efectos de una sola erupción volcánica, lo que realmente importa es la carga total de polvo depositada en la estratosfera y su influencia sobre la máquina atmosférica. Las especulaciones más extremas acerca de los efectos conjuntos de muchas erupciones volcánicas que tuvieran lugar en todo el mundo durante un corto período de tiempo provienen de los climatólogos que sostienen que el polvo en la atmósfera puede por sí solo causar el comienzo de una glaciación. Su argumento queda algo debilitado por el hecho de que los ritmos de Milankovič expliquen tan bien la pauta de fluctuaciones de la reciente glaciación, pero hay algunas pruebas geológicas de que las épocas de gran cobertura nivosa sobre el suelo fueron también épocas de actividad volcánica en aumento, pues el polvo de los volcanes, cuando

al fin se sedimenta, deja una capa detectable en las rocas que puede datarse bastante bien. Hay, no obstante, una explicación de esto distinta de la obvia de que, al dificultar el paso de la radiación solar, el polvo volcánico provocó el aumento de la cobertura nivosa. Podría ser que los hielos, efectuando presión sobre los continentes, causaran el incremento de actividad volcánica, es decir, obligaran al magma a salir de los depósitos volcánicos como cuando hacemos salir la pasta de dientes oprimiendo el tubo. Este argumento no es de ningún modo una broma, sino que concuerda con los hechos al menos tan bien como la idea de que los volcanes desencadenan las glaciaciones. La cuestión seguirá discutiéndose acaloradamente, sin perspectivas de respuestas definidas en un sentido u otro. Por suerte, éste es un debate académico de escasa significación en cuanto a la forma en que varía el clima en una escala de tiempo importante para la humanidad.

EL KRAKATOA Y EL VELO DE POLVO

La erupción del Krakatoa es el clásico ejemplo de una erupción volcánica importante para el hombre, como indica su lugar eminente en el «índice de velo de polvo» de Lamb. Dicha erupción animó también al meteorólogo norteamericano Harry Wexler a pensar sobre las relaciones entre los volcanes y el tiempo hacia mediados del siglo XX, y el trabajo de este científico sentó las bases de nuestra presente comprensión de esas relaciones. Hacia 1880, con mejores comunicaciones y sin guerras en curso que los distrajeran, tanto los hombres de ciencia como los profanos pudieron maravillarse de los cambios que la erupción del Krakatoa produjo en la atmósfera. Un informe especial de la Royal Society[4] sobre la erupción incluía una sección de 312 páginas bajo el título «Sobre los desacostumbrados fenómenos ópticos de la atmósfera en 1883-86: efectos crepusculares, aparición de coronas,

[4] Prestigiosa sociedad científica británica *(N del T).*

calina, soles y lunas coloreadas, etc»., y muchas personas se maravillaron ante las espectaculares puestas de sol teñidas de verde y la aparición de una luna azul. La historia comienza realmente el 27 de agosto de 1883, cuando la isla de Krakatoa fue destruida por una explosión volcánica tan intensa que se calcula que lanzó unos 55 km^3 de rocas, polvo y cenizas a la atmósfera. El penacho de cenizas y polvo pudo alcanzar una altura de 80 km, y ciertamente dispersó grandes cantidades de material en la estratosfera. La nube de finas partículas fue transportada hacia el oeste por los vientos dominantes de la atmósfera superior en la zona ecuatorial, y hacia la segunda semana de septiembre se había extendido alrededor del mundo. A medida que transcurrían las semanas se desplazó por latitudes más altas, cubriendo Europa hacia finales de noviembre. Durante los últimos días de ese mes, los europeos disfrutaron de cielos de intensos colores y puestas de sol teñidas de rosa que se prolongaban hasta mucho después que el Sol hubiera desaparecido, mientras que en el Observatorio de Montpellier, en el sur de Francia, los astrónomos registraron con sorpresa un descenso en sus medidas de radiación solar directa desde un 30% por encima de la normal para la época del año hasta un 20% por debajo de la normal. La radiación solar directa registrada por el Observatorio se mantuvo un 10% por debajo de la normal durante tres años después de la erupción, pero esto no significa que un 10% del calor solar quedara interceptado por el polvo en la atmósfera.

Sólo cierta cantidad del calor solar incidente que parece que se pierde es realmente devuelto al espacio por el polvo. Una parte del calor se invierte en calentar el propio polvo, tanto en la estratosfera como en la troposfera, y otra parte es dispersada hacia un lado, de modo que aún llega a alcanzar el suelo aunque no procede directamente del disco solar, lo cual es en realidad lo que las medidas de radiación solar directa registran. Si la emisión solar disminuyera en un 1%, la temperatura media en la superficie del suelo descendería aproximadamente de 1,5 a 2°C. Reid Bryson, junto con su colaborador Brian Goodman, escribían en *Science*, en 1980, que durante períodos históricos en los que la disminución medida de la

radiación solar directa había sido de un 5%, su estima del enfriamiento de la superficie de la Tierra había sido de menos de 1° y no casi de 10° (suficiente para desencadenar una nueva glaciación), debido a que la disminución de la radiación solar directa queda casi compensada por el aumento de radiación indirecta o difusa, dispersada lateralmente por el polvo[5].

Así pues, aparte de las espectaculares puestas de sol y otros efectos secundarios, la influencia de una o dos erupciones de la importancia de la del Krakatoa podría ciertamente desequilibrar la balanza entre las presentes condiciones climáticas y las de la «pequeña glaciación» y, por supuesto, cualesquiera otras intermedias. Cuando Wexler escribió sobre los volcanes y el tiempo en 1952 en el *Scientific American*[6], mostró más interés por las variaciones climáticas en la primera mitad del siglo XX, el calentamiento global con respecto al siglo XIX que hizo tan distintos los mediados del presente siglo en comparación con el pasado milenio, e hizo notar «el curioso hecho de que desde 1912 no se han producido erupciones volcánicas importantes en el hemisferio norte, y que durante este período los inviernos han sido cada vez más cálidos». No mencionó, sin embargo, el hecho también interesante de que durante ese mismo período la actividad solar había ido aumentando de un ciclo solar a otro, y descartó la idea de una relación entre la actividad solar y el tiempo diciendo que la tendencia ascendente «había continuado a través de tres ciclos completos de manchas solares. La única variación importante ha sido que, mientras durante los 150 años anteriores a 1912 los volcanes entraron en erupción en una gran explosión detrás de otra en el hemisferio norte, desde 1912 han estado relativamente tranquilos».

---

[5] Estos cálculos particulares de Bryson y Goodman se refieren no sólo al polvo volcánico en la atmósfera, sino también a polvo debido a actividades humanas Esto no afecta al argumento sobre la dispersión lateral y la influencia efectiva del Krakatoa en el clima.

[6] Revista norteamericana de alta divulgación científica, publicada en España bajo el nombre de «Investigación y Ciencia» *(N del T).*

Al igual que muchos pioneros entusiastas. Wexler exageró un poco. Como veremos, muchas de las características de los cambios climáticos durante los últimos 300 años pueden explicarse de la forma más adecuada mediante una *combinación* de la influencia solar y de los efectos del polvo volcánico en la atmósfera. Sin embargo, esto sólo quedó claro después que Lamb compilara minuciosamente su definitivo índice de velo de polvo.

La importancia del efecto que el polvo en la atmósfera ejerza sobre el clima depende tanto de la naturaleza del polvo como de la región atmosférica donde se encuentre. La erupción del Krakatoa, por ejemplo, fue menos importante que la del Tambora en términos climáticos, aunque produjese un velo de polvo tan notorio[7]. Lamb divide las erupciones que arrojan polvo a la atmósfera en dos categorías, estableciendo una distinción entre capas de polvo en la baja estratosfera, entre unos 20 y 27 km de altura, y las que llegan más arriba, hasta 50 km. Paradójicamente, el *primer* grupo es el más importante en cuanto a la influencia sobre el clima, puesto que tales erupciones dan lugar a velos de polvo densos y de larga duración. Las erupciones más raras, las que arrojan polvo por encima de los 50 km. son menos importantes para el cambio climático a grandes rasgos y para el IVP medio, simplemente porque muy poco polvo llega tan arriba. Además, hoy día muchos científicos creen que puede no ser sólo el polvo lo que impide el paso del calor solar. Los volcanes producen también grandes cantidades de gases, entre ellos óxidos de azufre, que reaccionan con el agua para producir ácido sulfúrico, y otras gotículas, que pueden penetrar en la estratosfera como una fina neblina, ocultando el Sol. Sin embargo, el efecto es el mismo: las erupciones más grandes,

---

[7] Incidentalmente, la erupción del Tambora produjo también espectaculares puestas de sol, lunas azules y daños en las cosechas. Un curioso resultado es bien conocido hoy en el trabajo del gran pintor inglés J. M. W. Turner, que produjo algunas de sus mejores obras, llenas de color y extrañas luces, en los años posteriores a la erupción del Tambora La creación de estas pinturas llamativas fue influida, según parece, por la extraordinaria iluminación que Turner observó en el mundo real de su tiempo.

las que tienen mayor IVP en la escala de Lamb, siguen siendo las más importantes en términos climáticos, tanto si lo que actúa es el polvo, el ácido sulfúrico o ambos conjuntamente.

Tabla 3. Erupciones volcánicas más importantes desde los tiempos de Benjamin Franklin hasta 1970, año en el que Hubert Lamb publicó su índice de velo de polvo (IVP)

Año	Volcán	Situación	IVP
1783	Eldayjar, Islandia	63½°N 23°O	700 (?)
	Laki y Skaptar Jókull,Islandia	64°N 18°O	
1783	Asama, Japón	36½°N 138½°E	300
	Velo total, 1783:		1.000
1786	Pavlov, Alaska	55½°N 162°O	150
1795	Pogrumnoy, Umanak Is., Aleutianas (Alaska)	55°N 165°O	300
1796	Bogoslov, Aleutianas	54°N 168°O	100
1799	Fuego, Guatemala	14½°N 91°O	600
1803	Cotopaxi, Ecuador	1°S 78°O	1.100 (?)
1807-10	Varios, incluye:		
	Gunung Merapi, Java	7½°N 110½°E	(?)
	and Sao Jorge, Azores	38½°N 28½°O	(?)
	Velo total, 1807-10:		1.500 (?)
1811	Sabrina, Azores	38°N 25°O	200
1812	Soufriére, St. Vincent	131/2°N 61°O	300
1812	Awu, Great Sangihe, Celebes	3'/2°N 125½°E	300
1813	Vesubio	41°N 14°E	100
1814	Mayon, Luzon	13½°N 123½°E	300
1815	Tambora. Sumbawa	8°S 118°E	3.000
	Velo total, 1811-18:		4.400
1821	Eyjafjallajókull, Islandia	63½°N 19½°O	100
1822	Galunggung, Java	7°S 108°E	500
1826	Kelud, Java	8°S 112½°E	300
1831	Isla de Giulia o Graham’s	37°N 12-13°E	200
1831	Pichincha, Ecuador	0°S 78½°O	(?)
1831	Babuyan, Filipinas Is.	19°N 122°E	300
1831	Barbados	13°N 60°O	(?)
	Veilo total 1831-33:		1.000
1835	Coseguina, Nicaragua	13°N 87½°O	4.000
1845	Hekla, Islandia	64°N 19½°O	250
1846	Armagora, Pacifico Sur	18°S 174°O	1.000
1852	Gunung Api, Banda, Moluccas	4½°S 130°E	200
1856	Cotopaxi, Ecuador	1°S 78°O	700
1861	Makjan, Moluccas	1½°N 127½°E	800
1875	Askja, Islandia	65°N 17°O	300

1878	Ghaie, Nueva Irlanda, Bismarck Archipiélago	4°S 152°E	1.250
1883	Krakatoa	6°S 105½°E	1.000
1888	Bandai San, Japón	38°N 140°E	250
1888	Ritter Is., Bismarck Archipiélago	5½°S 148°E	250
	Velo total. 1883-90:		1.500
1902	Mont Pelée, Martinique	15°N 61°O	100
1902	Soufriere. St. Vincent	13½° N 61°O	300
1902	Santa Maria, Guatemala	14½°N 92°O	600
	Velo total, 1902:		1.000
1907	Shtyubelya Sopka/ Ksudatch, Kamchatka	52°N 157½°E	150
1912	Katmai. Alaska	58°N 155°O	150
1963	Mt. Agung (Gunung Agung), Bali	8½°S 115½°E	800
1966	Awu, Great Sangihe, Celebes	½°N 125½°E	150-200
1968	Fernandina, Galápagos	½S 92°O	50-100
	Velo total. 1963-68:		1.100
1970	Isla Decepción.	63°S 60½°O	(200)

Fuente. Lamb, *Climate: Present, Past and Future.*

El efecto de velado de la erupción de 1883 del Krakatoa se considera arbitrariamente como 1.000, y las otras erupciones son comparadas con este patrón, usando diversos archivos históricos.

Lamb confirmó que muchos de los más fríos y lluviosos veranos en Gran Bretaña. Norteamérica y Japón han sido, como los de 1816 y 1784, «años de polvo volcánico». Sostiene que «el polvo volcánico podría haber intervenido en todos los peores veranos de estos siglos [del XVII al XX]», y que «parece manifiesto que en Europa también hay una tendencia a inviernos fríos después de algunas erupciones volcánicas, evidentemente aquellas ocurridas en bajas latitudes que producen velos de polvo extendidos a todo el mundo». La palabra clave aquí es *tendencia,* pues ni siquiera Lamb afirma que la variación del IVP sea responsable de todos los cambios climáticos de los pasados tres o cuatro siglos. El trabajo de Lamb, así como otros estudios, muestran que el polvo *contribuye* de manera importante a los cambios climáticos, pero, de nuevo en palabras de Lamb, «pese a ello, el polvo volcánico no es la única —y probablemente ni siquiera la más importan-

te— causa de variación climática dentro del período estudiado». Esto queda claramente confirmado por la investigación de Schneider y Mass, quienes mostraron que una combinación de la cambiante influencia volcánica, medida por el IVP de Lamb, y de la cambiante influencia solar, medida por el número de manchas solares, es lo que mejor explica la pauta de cambios climáticos desde la «pequeña glaciación».

A este respecto, puede que el pionero haya sido demasiado cauteloso al proponer su idea, ya que, a finales de 1979. Alan Robock, de la University of Maryland (EE UU.), publicó en *Science* un análisis que sugería que el conjunto de cambios climáticos estudiados por Schneider y Mass está dominado por las influencias volcánicas antes que por la influencia solar.

UNA PERSPECTIVA AMPLIA

Todas estas interpretaciones parece como si dependieran del programa de computador que mejor permita concluir la manera en que la atmósfera responde a diferentes influencias, y ninguna de estas ideas puede considerarse aún como definitiva. En el programa de computador de Robock se tienen en cuenta los cambios de albedo de la Tierra causados por las fluctuaciones de nieve y hielo, un efecto de las variaciones solares que rebaja los números de manchas solares a lo largo del ciclo completo de 11 años (aunque, por desgracia, no tiene en cuenta los resultados del trabajo de Kondratyev y Nikolsky, según los cuales los números muy altos de manchas, así como los muy bajos, están ligados a condiciones más frías en la Tierra), los efectos del polvo volcánico, con un IVP de 160 correspondiente a un 0,5% de disminución en la radiación solar directa, el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera e. incluso, un efecto aleatorio de mezcla para hacer la cosa más «natural» Las cifras que salen del computador reproducen mejor el registro real de variaciones de temperatura desde 1600 cuando se toma el IVP como único factor variable, las variaciones del número de manchas

solares no concuerdan tanto. Sin embargo, tal vez ello nos esté diciendo más sobre este programa particular que acerca de las relaciones Sol/tiempo, pues, como dice Robock, «el resultado no excluye cambios en la constante solar como causas de cambios climáticos, pero, si existe tal relación, tales cambios deben ...[estar ligados]... con las manchas solares de forma muy compleja». Esa complejidad, que lleva consigo variaciones en la transparencia de la estratosfera, el nexo con los rayos cósmicos galácticos y la inversión del efecto para números de manchas solares superiores a 80, es precisamente lo que determina el estudio llevado a cabo por los investigadores rusos.

En cuanto a relaciones complicadas, hay algunas muy curiosas descubiertas por Mick Kelly y sus colegas de la University of East Anglia. Kelly, quien estudió las teorías de Lamb, ha buscado variaciones regulares en el IVP y en el clima, descubriendo que ambos muestran un ciclo de 7 a 8 años de duración. No es probable que dos de tales ciclos fueran acompasados simplemente por casualidad durante el período estudiado (de 1725 a 1950), y este descubrimiento por sí solo reafirma la idea de que la cambiante actividad volcánica influye sobre el clima. El ciclo volcánico de 7 a 8 años también debe de estar relacionado con una fluctuación semejante y conocida en la rotación de la Tierra, a lo largo de la cual la duración del día primero aumenta y después disminuye en una fracción de segundo. Es bastante razonable suponer que los bamboleos de la Tierra pudieran desencadenar erupciones volcánicas y, por tanto, influyeran en el tiempo, aun si se tratara de bamboleos pequeños; sin embargo, cuando escribió con Lamb en *Nature*, en 1976. Kelly comentó un descubrimiento mucho más curioso: un ritmo de 180 años en la actividad volcánica como resultado de las variaciones de la tensión de marea que actúa sobre la Tierra. El ciclo de 180 (o 179) años en los registros meteorológicos es conocido a partir de estudios como los de Hurd Willett, y muchos autores han hablado acerca de un ciclo similar de 179 años en la actividad solar. Las variaciones de la tensión de marea sobre la Tierra están relacionadas con cambios a largo plazo de las fuerzas

gravitatorias de los planetas del Sistema Solar, que actúan sobre la Tierra al moverse en sus distintas órbitas alrededor del Sol. Algunos comentaristas han «explicado» el ritmo solar de 179 (180) años como debido también a las cambiantes influencias de las mareas debidas a los planetas, que se repiten a lo largo de un período de esta duración. Todo esto plantea la enigmática posibilidad de que, aun cuando el Sol y la Tierra responden al mismo ritmo de 180 años, de modo que el Sol parece que afecta al tiempo en la Tierra, de hecho, las variaciones en las manchas solares así como las variaciones volcánicas/climáticas en la Tierra pueden producirse de forma independiente.

Esto es suficiente para marear a cualquiera, pero realmente añade interés a la tarea de los observadores de vigilar la actividad solar y el tiempo durante los próximos veinte años para someter a prueba las predicciones de Willett esbozadas al final del capítulo 5. Bien, después de esas esotéricas complejidades, se agradece volver de nuevo a la Tierra con una visión completamente clara de la relación entre el nivel general de actividad volcánica de los pasados 10.000 años y las fluctuaciones de temperatura en el hemisferio norte, proporcionada por nuestros viejos amigos, los cilindros de hielo del casquete groenlandés.

El equipo de Willi Dansgaard está siempre explorando nuevos caminos para extraer información de las muestras de hielo de Groenlandia, y, en 1980, un grupo del laboratorio de Copenhague, encabezado por C. U. Hammer, informó sobre el éxito de sus intentos de detectar trazas de erupciones volcánicas en las mismas muestras que les proporcionan medidas directas de las temperaturas en el pasado a partir de las variaciones en la proporción de los isótopos del oxígeno en el hielo. Las trazas volcánicas son, si cabe, más fáciles de analizar que el termómetro de isótopos del oxígeno, una vez se tuvo la idea. Dado que las erupciones volcánicas expulsan enormes cantidades de gases ácidos a la atmósfera —donde pueden ser tan importantes como las partículas de polvo en cuanto al enfriamiento de la Tierra—, los períodos de gran actividad volcánica son también períodos de lluvias ácidas, o

de nevadas ácidas en el caso del casquete de hielo groenlandés. Las trazas de ácido en la nieve que se acumula en el casquete polar conducen la electricidad con mayor facilidad que el agua pura o el hielo, de modo que pueden detectarse midiendo la conductividad de muestras de hielo fundidas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del hielo sólido, o simplemente oprimiendo contra las bases limpiamente cortadas de la muestra un par de electrodos con una diferencia de potencial de 1.250V y registrando la corriente que pasa. Este método, rápido y efectivo, tiene la ventaja de dejar la muestra intacta para otros estudios, tales como las medidas de isótopos para determinar las variaciones de temperatura en el pasado, y el resultado es una inequívoca medida de ambas cosas, vulcanismo global en el pasado y temperatura en la misma época, a partir de la misma muestra de hielo.

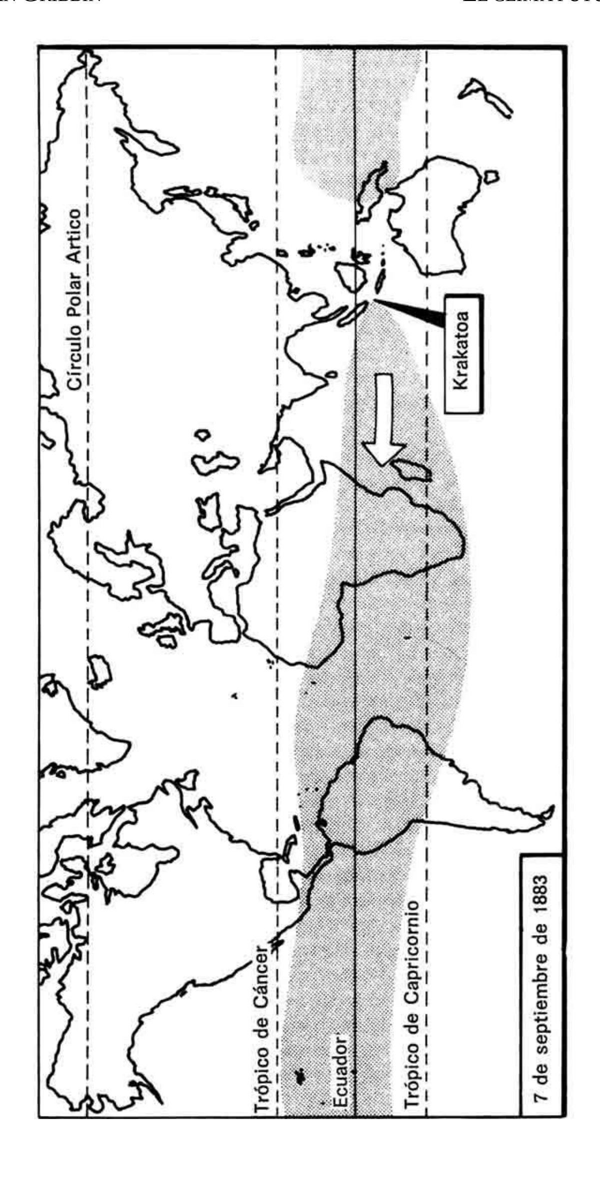
La comparación de las medidas de las capas superiores de hielo con los datos históricos de actividad volcánica muestra que la prueba del ácido resulta muy buen indicador de la actividad volcánica en latitudes al norte de 20°S. Estas son, en cualquier caso, las latitudes significativas para el clima del hemisferio norte, donde se encuentra la mayor parte de los continentes y de la población de la Tierra. El registro de acidez muestra que la actividad volcánica persistente al norte de 20°S ha sido una importante pero —como los daneses señalan— no la única causa «de fluctuaciones climáticas de hasta varios cientos de años de duración en latitudes medias y altas» del hemisferio norte durante los pasados 10.000 años. Las variaciones de acidez no sólo concuerdan con las variaciones de temperatura de las muestras de Groenlandia, sino con variaciones estimadas a partir de anillos de árboles y con la serie más larga de temperaturas y cálculos de temperatura en el centro de Inglaterra.

Las medidas también vinculan ciertos datos histórico-anecdóticos al registro volcánico, con alta acidez hacia el año 50 a.C., sugiriendo una de las más grandes erupciones del hemisferio norte desde la plenitud de la última glaciación. Plinio el Viejo nos dice que el año de la muerte de César (44 a.C.) el Sol lució débilmente «durante casi un año, cuando el

dictador César fue asesinado», y Virgilio afirma que «cuando César murió, el Sol sintió piedad de Roma, por lo que cubrió su brillante faz con oscuridad, y la impía generación temió una noche eterna». Esta curiosa anticipación a las observaciones de Ben Franklin en 1784 sugiere una importante erupción volcánica en alguna parte del mundo, una erupción ahora confirmada por el archivo de ácido en las muestras de hielo. Si las erupciones ocurridas a lo largo de los siglos pueden explicar, al menos en parte, las fluctuaciones climáticas del orden de la «pequeña glaciación», y si las erupciones aisladas o múltiples, como las del año 44 a.C., 1783 y 1815, han ejercido tan notable influencia sobre el medio ambiente y la humanidad, ¿cómo hemos podido salir virtualmente intactos de la también espectacular erupción del monte St. Helens?

ST. HELENS: UN CASO DE SUERTE

El verano de 1981 no fue como el de 1816 por una importante razón. De forma inusitada, la explosión del monte St. Helens se dirigió hacia un lado y no hacia arriba, como es normal, ya que un lado de la falda de la montaña se hundió y liberó la presión acumulada en el interior con gran violencia. La explosión devastó una zona de unos 400 km^2, y los efectos de la misma se extendieron 22 km hacia el noroeste y 19 km hacia el norte. Esta erupción tuvo lugar el 18 de mayo de 1980 y se ha estimado que equivalía a una cifra comprendida entre 10 y 50 Mt de TNT. Sin embargo, sólo una parte de los 2,5 km^3 de roca pulverizada en cenizas por la explosión, equivalente a más de 500 veces la potencia explosiva de la bomba de Hiroshima, fue dirigida hacia arriba en la atmósfera. No se formó una nube de polvo que circundara el globo a gran altura, y, aunque hubo efectos mensurables de la erupción en la estratosfera, la disminución del calor solar que llega al suelo y los efectos sobre el tiempo en 1981 fueron mínimos.


Círculo Polar Artico
Trópico de Cáncer
Ecuador
Trópico de Capricornio
Krakatoa
7 de septiembre de 1883

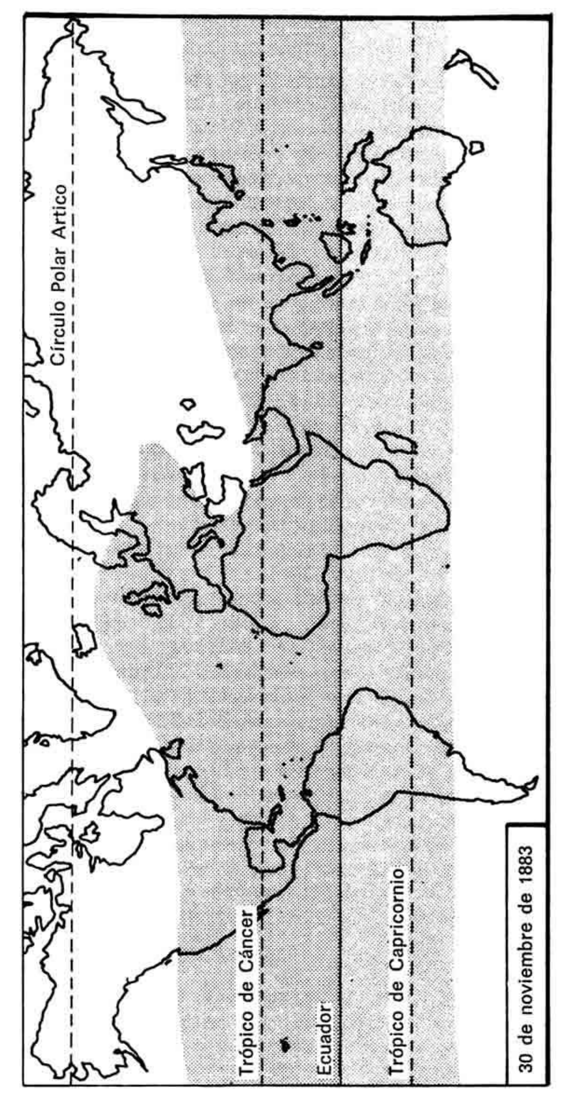


Fig. 6-1. El informe de la Royal Society sobre la erupción del Krakatoa detallaba la propagación de la nube de cenizas volcánicas a grandes alturas alrededor del globo.

Incluso si el polvo de St. Helens hubiera sido arrojado verticalmente hacia la atmósfera, los efectos no habrían sido tan graves como los de la erupción del Tambora en 1815. porque tanto los archivos históricos como los actuales programas de computadores de alta velocidad demuestran que el polvo inyectado en la estratosfera en las regiones tropicales se dispersa más y produce mayores efectos que el polvo inyectado por volcanes a altas latitudes, como el de St. Helens. De todos modos, en conjunto, en una serie de erupciones ocurridas en 1980. St. Helens arrojó una masa de polvo que el profesor Lamb estimó como mucho mayor que la arrojada por el Krakatoa en 1883. Así pues, la latitud del volcán por sí sola podría no haber sido suficiente para salvarnos del mal tiempo y de los daños en las cosechas en 1981, si no hubiera sido porque el polvo fue arrojado lateralmente, donde sofocó la troposfera viento abajo de St. Helens en lugar de alcanzar la estratosfera por encima, y quedó pronto eliminado de la atmósfera por la lluvia.

La mejor manera de hacernos idea de lo que podría haber sucedido es recordando los sucesos de 1816, resumidos por el matrimonio Henry y Elizabeth Stommel, ambos investigadores de la Woods Hole Oceanographic Institution. Los Stommel tienen intención de escribir un libro sobre «el año sin verano», pero, mientras tanto, han resumido todos sus descubrimientos en un riguroso y amplio artículo del *Scientific American* que proporciona una sucinta descripción de los efectos del Tambora sobre el tiempo de Norteamérica y Europa.

Hubert Lamb clasifica la erupción del Tambora de 1815 como uno de los dos sucesos únicos de máxima producción de polvo estratosférico entre 1600 y nuestros días. La altura del monte Tambora se redujo casi 1.400 m. y la erupción expulsó unos 100 km^3 de detritus, no todos ellos en forma de fina ceniza. No se conoce con exactitud cómo el polvo se extendió alrededor del mundo, pero la pauta debió de ser similar a la de la dispersión del polvo del Krakatoa (fig. 6-1). Los marinos informaron del hallazgo de grandes islas de piedra pómez flotante derivadas de la erupción hasta cuatro

años después de ella. A medida que el polvo se extendió a latitudes más altas, la zona templada experimentó, no un enfriamiento gradual, sino varias olas de intenso frío, que en primer lugar destruyeron las cosechas y luego arruinaron los repetidos esfuerzos de los agricultores por salvar algo del desastre.

En Nueva Inglaterra, una fría y tardía primavera en 1816 provocó sólo las habituales quejas por parte de los labradores, y un buen comienzo de junio pareció que compensaba las pasadas heladas de mayo. Sin embargo, una ola de frío que se movía hacia el este penetró en Nueva Inglaterra a partir del 6 de junio, manteniéndose durante cinco días y dejando varios centímetros de nieve en el suelo. Hoy podemos identificar la ola de frío con una lengua del vórtice circumpolar dilatado que se extendió hacia abajo desde el helado norte; en 1816, la gente sólo podía asombrarse ante tan extrañas condiciones, como informaba el *North Star* de Danville, en Vermont (EEUU.):

> «El miércoles pasado [5 de junio] fue un día tan cálido y bochornoso, como tal vez no lo habíamos tenido desde septiembre. Por la noche se observaron relámpagos de calor; pero, el jueves por la mañana, el cambio de tiempo fue tan grande que no sólo se estaba a gusto cerca del fuego, sino que realmente hacía falta estar junto a él. El viento durante todo el día resultó tan frío y cortante como lo suele ser a principios de noviembre y abril. Hacia las diez de la mañana empezó a nevar y a granizar, y la tormenta continuó hasta el anochecer, acompañada de un viento fresco que hizo necesarios los atuendos invernales para aquéllos que lo habían de soportar... probablemente nadie de los que viven en el país ha visto nunca tal tiempo en esta época, sobre todo con tal persistencia».

Pero no faltaba mucho para que lo volvieran a experimentar. Poco después que los sorprendidos agricultores hubieran empezado a reparar los daños de la semana de tiempo impropio que acababan de pasar, a principios de julio, una segunda ola de frío barrió la región. Ésta fue menos rigurosa que las dañinas heladas y nevadas de junio, pero todavía más notable por haber ocurrido tan entrado el verano. El hielo y la escarcha destrozaron las cosechas entre el 5 y el 9 de julio, y el

tiempo de verano retornó el 12 de julio, permaneciendo el ambiente agradable hasta el 20 de agosto. En esos días estaba a punto de comenzar la siega de lo que quedaba de los cultivos después de los estragos causados por las dos olas de frío; pero entonces llegó la peor de las olas de frío fuera de estación que se dieron aquel verano. La escarcha acabó con las cosechas en New Hampshire y Maine, y creó problemas bastante más al sur, en Massachusetts; las montañas de Vermont quedaron cubiertas de nieve, y se arruinaron los cultivos de maíz en las llanuras. No es sorprendente que las condiciones fueran bastante peores más al norte, en Canadá, donde incluso se perdió el trigo, que en Estados Unidos pudo sobrevivir bastante bien.

En una Europa devastada por las últimas fases de las guerras napoleónicas, que habían terminado en 1815 con la batalla de Waterloo y el exilio de Napoleón en la isla de Santa Elena, la agricultura y la economía quedaron destrozadas por el tiempo de 1816. Los franceses, en particular, no tenían reservas para afrontar ni siquiera un verano mínimamente malo, y muchas regiones fueron afectadas por el hambre y los disturbios. Durante los años comprendidos entre 1801 y 1912, los precios más altos del trigo se registraron en Francia en 1817, al doble del valor medio para dicho período. Y cuando Europa se volcó hacia Norteamérica para adquirir grano, los precios allí también subieron. La mala cosecha de Pennsylvania, al norte, así como la demanda de Europa provocaron una vertiginosa subida del trigo desde $1,30 por *bushel*[8] en la primera década del siglo XIX hasta $2,45 en 1817, antes que volviera a nivelarse un poco por encima del dólar por *bushel* durante los siguientes treinta años. Al exportar la harina a Inglaterra y a la Europa continental a precios elevados, algunos traficantes hicieron el gran negocio, mientras que mucha gente tuvo que prescindir de ella. La escasez de alimentos y el mal tiempo se combinaron para animar a un gran número de personas a desplazarse hacia el oeste en busca de tierras vír-

[8] Unidad de medida de capacidad, equivalente a 35,24 litros *(N del T)*.

genes; por ejemplo, el número de presuntos pioneros que abandonaron Vermont en 1816-17 fue casi el doble que en otros años de la década, mientras que, en Ohio, el periódico *Messenger* de Zanesville comentaba en su edición del 31 de octubre de 1816 que «el número de emigrantes procedentes del este en la presente temporada ha excedido con mucho lo que se había visto con anterioridad».

Y todo esto, debido a la erupción de un volcán en el otro lado del mundo. Sin embargo, tal vez el aspecto más extraño de toda la historia es que parece que nadie haya establecido la relación entre ambos sucesos. Algunos científicos del siglo XIX echaron la culpa del mal tiempo a las manchas solares o a la ausencia de ellas: otros atribuyeron los sucesos de 1816 a una extensión de los témpanos de hielo del Ártico hacia el sur. Una extraña idea relacionó el «año sin verano» con Benjamín Franklin, pero no con su relato del polvo atmosférico en 1783-84. Esta curiosa teoría mantenía que la Tierra era calentada no sólo por el calor del Sol, sino también por el «calor eléctrico» que escapaba de su interior. La puesta en uso de los pararrayos, inventados por Franklin, según el argumento había distorsionado el flujo natural de esta electricidad interna y, por tanto, había desbaratado el tiempo. Si Franklin hubiera vivido todavía, seguro que habría puesto las cosas en su sitio: pero, tal como eran los hechos, en muchos periódicos aparecían informes sobre el mal tiempo junto a otros que comentaban la existencia de grandes islas de cenizas volcánicas flotando en el Pacífico. Hubo que esperar hasta la segunda mitad del siglo XIX para que los científicos relacionaran ambas cosas como causa y efecto.

Ninguna de las erupciones aisladas del St. Helens llegó a igualar a la única y excepcional explosión del Tambora y ni siquiera a la gran erupción del Krakatoa. Sin embargo. St. Helens permaneció activo durante todo el año 1980, con seis fases principales de erupción explosiva, la primera de las cuales fue, con mucho, la mayor y más espectacular. La erupción inicial hizo volar los 400 m superiores de la cima de la montaña, lo cual la sitúa en la misma categoría que la del Tambora si bien con una intensidad de aproximadamente un

tercio de la de aquélla. La explosión se oyó a una distancia de 320 km y produjo un penacho de humo que ascendió 14.500 m en el cielo. Incluso a 800 km de la montaña, las cenizas ácidas que se depositaron tras la explosión se acumularon hasta un espesor de 1.5 cm, y hacia el 20 de mayo, a 2.000 km de distancia, en Manitoba y Ontario, las cenizas reducían la visibilidad a 5 km. En términos más corrientes, el penacho de ceniza contenía 1.300 millones de metros cúbicos de materia, lo cual representa una gran cantidad de ceniza, como cualquiera que haya comprado a un constructor un metro cúbico de arena puede apreciar. El coste total de los daños fue superior a 1.500 millones de dólares, con las cosechas, los huertos y los bosques devastados: 23 buques quedaron varados por la acumulación de sedimentos en la bahía de Portland. No obstante, toda esta ceniza, que causó tantos inconvenientes a muchas personas y que proporcionó una espectacular película televisiva para el resto de nosotros, fue ceniza que *dejó de penetrar* en la estratosfera. El mismo hecho de que tanta gente fuera directamente afectada por la erupción en Estados Unidos y Canadá significó que el resto del mundo se librara de un invierno como el de 1816. Aun así, la estratosfera no salió del todo intacta.

Cámaras a bordo de globos lanzados a la estratosfera por un equipo de investigadores franco-belgas, el 7 de mayo y el 5 de junio de 1980, muestran claramente el efecto de oscurecimiento producido por el material del monte St. Helens. En mayo, antes que la nube llegara a Europa, las fotografías tomadas muestran cielo claro y buena visibilidad a 15 km de altura y ofrecen un impresionante panorama de más allá de las nubes que había en la troposfera. En junio, las fotografías tomadas en idénticas circunstancias muestran solamente una bruma opaca. Otros instrumentos a bordo de los globos informan que esta bruma estaba constituida por millones de pequeñas partículas, llamadas aerosoles[9]. El espesor de las

[9] Los familiares «pulverizadores de aerosol» *(sprays)* se llaman así porque producen una fina niebla de partículas de tamaño similar, lo bastante fina como para quedar suspendida en el aire.

capas de aerosol oscilaba entre 100 m y varios kilómetros, pero éstos dominaban la región desde algunos kilómetros de altura hasta aproximadamente 15 km. donde se interrumpían con brusquedad. Tales capas debieron de absorber el calor solar que de otra manera hubiera llegado al suelo, pero no produjeron un enfriamiento espectacular porque la mayor parte de la energía se absorbía todavía en la troposfera, capa de la atmósfera donde se desarrolla el tiempo. Las pruebas revelan que la materia del St. Helens —polvo, gotículas de ácido sulfúrico o lo que fuera— simplemente no llegó a alcanzar las alturas próximas a los 25 km que Hubert Lamb ha considerado de suma importancia para que el velo de polvo influya sobre el clima.

Tras reunir las mejores observaciones del polvo procedente del St. Helens en los meses siguientes a la erupción y tras introducir los datos en su programa de computador de la respuesta de la atmósfera a los velos de polvo, Alan Robock pudo calcular cuál fue el efecto de la erupción sobre nuestro tiempo. El programa climático utilizado tiene en cuenta la latitud de la erupción y la lenta difusión del velo de polvo alrededor del mundo, así como el espesor de las capas y su efecto, medido, sobre la radiación solar incidente. El resultado del cálculo muestra que el mayor efecto sobre el clima global fue un enfriamiento de sólo 0,1°C en las regiones árticas para el mes de enero de 1982. Como las temperaturas de invierno en las regiones polares pueden variar fácilmente 2,5°C de un año a otro debido a los diversos factores que afectan el tiempo, lo que los cálculos de Robock nos dicen realmente es que el efecto de la erupción del monte St. Helens sobre nuestro tiempo ha sido demasiado pequeño para medirlo. Sin embargo, otros volcanes del siglo XX han influido más en el tiempo y el clima.

EL SIGLO XX Y EL VOLCÁN HUMANO

Desde finales del siglo XIX, el mundo en conjunto (las medidas son del hemisferio norte, pero se cree que represen-

tan una tendencia global) se calentó primero ligeramente, medio grado centígrado, y después se enfrió a partir de 1940. Hacia los años setenta, el enfriamiento había alcanzado 0,5°C desde el máximo de principios de la década de 1940. Dentro de ciertos límites, como hemos visto, este cambio puede relacionarse con variaciones en la actividad solar. Sin embargo, otro factor que puede haber tenido importancia —el problema es cuánta importancia— es la pauta cambiante de actividad volcánica. Los cálculos de Lamb del índice de velo de polvo (tabla 3) muestran que el tiempo a mediados del siglo XX estuvo relativamente libre de los efectos de enfriamiento debidos al polvo volcánico. Después de varias erupciones a finales del siglo XIX y principios del XX, entre ellas la del Krakatoa, hubo pocos estallidos volcánicos durante varias décadas. Podría ser, como algunos climatólogos sostienen, que el enfriamiento del mundo hasta los años cuarenta correspondiese al tiempo que tardó el polvo en sedimentarse desde la estratosfera. Durante la segunda mitad del presente siglo, la actividad volcánica ha aumentado, con notables erupciones de los montes Spurr en Alaska (1953), Bezymiannyi en Kamchatka (1956), Agung en Bali (1963) y St. Helens en Estados Unidos (1980). No todas estas erupciones figuran en la lista de Lamb de contribuciones importantes al velo de polvo, pero muestran, junto con otras, que la Tierra ha estado sísmicamente activa en tiempos recientes tras un período de desusada quietud. No obstante, si se ha de atribuir al polvo la responsabilidad de los cambios climáticos, queda todavía el problema por resolver. ¿Por qué empezó el globo a enfriarse en los años cuarenta, una década antes de la reactivación del vulcanismo? Reid Bryson, de la University of Wisconsin-Madison, cree que tiene la respuesta.

El profesor Bryson está plenamente de acuerdo con la idea de que los ardientes volcanes causan condiciones gélidas en la Tierra. En *Climates of Hunger* (Climas de hambre) resume la teoría de la forma siguiente:

«El polvo en la atmósfera tiende a enfriar más las altas latitudes que las regiones tropicales, independientemente de la zona atmosférica

donde haya penetrado. Parte del polvo es arrastrado hacia el polo, en el curso de semanas y meses, por parte de las corrientes de aire que soplan a gran altura sobre los trópicos. Más importante, aun cuando el polvo estuviera distribuido igual en la atmósfera, las regiones más hacia el polo quedarían más ensombrecidas que los trópicos La luz solar sigue un trayecto casi vertical en los trópicos, pero lejos de ellos incide formando un ángulo y, por tanto, recorre un camino más largo en la atmósfera. Si ésta se mantiene polvorienta, la luz solar recorre un camino mayor a través del polvo y, a consecuencia de ello, es más atenuada».

Bryson explica la importancia del efecto de enfriamiento a partir de 1940 y el motivo de que se iniciara antes de la reactivación del vulcanismo, como resultado de la actividad humana. La contaminación producida por la humanidad también pasa a la atmósfera en forma de polvo, sea el levantado por el viento en la tierra arada, el humo de las chimeneas de las fábricas, los productos contaminantes de los escapes de automóviles y aviones, el polvo de tierras baldías arruinadas por métodos agrícolas erróneos, etc. Todo esto, según Bryson, equivale a un «volcán humano» en constante erupción que añade su carga a la atmósfera. Bryson estima en 15 millones de toneladas la cantidad de polvo suspendido en la atmósfera en cualquier momento, como resultado de la actividad del volcán humano, y cree que ésta es la influencia dominante en el clima actual, capaz de producir un enfriamiento global continuo.

La idea del volcán humano no deja de tener críticos. Depende en gran medida de cuál sea el tamaño de las partículas de polvo producidas por el hombre y en qué parte de la atmósfera estén concentradas. Como el propio Bryson indica, las partículas grandes de polvo pueden retener calor del suelo que de otro modo pasaría al espacio, y tal vez calienten así la Tierra. Son las partículas pequeñas —los aerosoles— los que tienden a dejar pasar el calor del suelo hacia el espacio, al mismo tiempo que impiden que el calor del Sol llegue al suelo. El climatólogo norteamericano Murray Mitchell estima que las actividades humanas producen, directa o indirectamente, alrededor del 30% de la carga total atmosférica de partículas de diámetro inferior a 5 micras (millonésimas de

metro), y, dado que la carga total es de aproximadamente 40 millones de toneladas, esto concuerda bastante bien con el cálculo de Bryson de una influencia antropogénica cifrada en 15 millones de toneladas. La pregunta clave es, pues, si esas partículas se hallan en regiones de la atmósfera por encima de zonas del globo de colores claros u oscuros.

Dicho en términos más sencillos, el polvo «gris» situado sobre una superficie blanca —tal vez un campo nevado— absorbe más calor solar incidente que la superficie blanca, de modo que el mundo se calienta; el mismo polvo gris situado sobre una superficie oscura —tal vez un campo arado— absorbe menos calor del que absorbería la superficie oscura, y el suelo se enfría. Ruth Reck, de los Laboratorios de Investigación de la General Motors en Warren. Michigan (EE.UU.), es uno de los investigadores que han cuantificado este sencillo cuadro, concluyendo que, para superficies subyacentes de albedo mayor de 0,6 (esto es, que reflejan el 60% de la radiación incidente), el efecto es siempre calentamiento, y para superficies subyacentes de albedo inferior a 0,5, el efecto es siempre de enfriamiento, independientemente de la altura de la capa de aerosol sobre las nubes. La hipótesis del volcán humano todavía espera ser aceptada, pero la opinión de los expertos hoy por hoy sostiene que, aunque el polvo antropogénico puede tener su importancia en el enfriamiento del globo, no es todavía tan significativo como el velo del polvo de las erupciones volcánicas. Parece improbable, no obstante, que el efecto del volcán humano esté produciendo un calentamiento neto de la Tierra: cualquiera que sea su efecto, debe de ser un enfriamiento, aun cuando tal vez no tan grande como Bryson y sus colaboradores han calculado.

Hasta ahora, puesto que el caso del monte St. Helens es una excepción a las normas volcánicas en muchos aspectos, la erupción volcánica del monte Agung en 1963 proporciona las pruebas mejor documentadas sobre la manera en que el polvo volcánico afecta la transmisión de radiación desde el Sol hasta la Tierra a través de la atmósfera. Una de las cosas que la erupción del St. Helens dejó clara es la importancia de las gotículas de ácido sulfúrico, y no sólo del polvo, en las capas

de aerosol de la estratosfera: y para apreciar esto en su justo valor, la cantidad de aerosol formada por dicha erupción (constituida por partículas de diámetros comprendidos entre 0,1 y 0,6 micras) fue aproximadamente de medio millón de toneladas Esta cantidad representa duplicar la «carga» usual de la atmósfera; sin embargo, se estima que el Agung contribuyó a la formación de 20 veces esa cantidad de aerosol estratosférico, mediante una erupción de aproximadamente la misma magnitud que la del 18 de mayo del monte St. Helens, pero dirigida hacia arriba, a la estratosfera.

Tras la erupción del monte Agung, la temperatura de la troposfera entre 30°N y 30°S descendió en casi medio grado centígrado para finales de 1964, y después se recuperó, alcanzando su promedio pre-erupción hacia finales de 1966. Los climatólogos quedaron satisfechos, en los últimos años de la década de 1970, de que sus cálculos con computador de la respuesta de la máquina atmosférica a la carga de aerosol volcánico produjese casi exactamente el comportamiento requerido: si podían reproducir la respuesta real de la atmósfera a una auténtica erupción volcánica, ello les daba confianza en que, mediante los mismos programas de computador, podrían predecir cómo respondería el mundo a perturbaciones hipotéticas, tales como el volcán humano o el aumento de dióxido de carbono. Sin embargo, a finales de 1979, James Coakley, del National Center for Atmospheric Research de Estados Unidos, informó sobre los últimos y mejores cálculos de ese tipo. Se basó en datos australianos que comparaban observaciones directas de la radiación del disco solar con observaciones de la radiación procedente del resto de la bóveda celeste cuando se ocultaba el Sol, y dedujo que la erupción del Agung «causó un enfriamiento en la baja atmósfera superior al doble que el predicho por la teoría».

Las cifras son familiares, pues ya vimos en el capítulo 5 cómo Kondratyev y Nikolsky explicaban el enfriamiento de mediados de la década de 1960 en función del efecto de los óxidos de nitrógeno producidos por pruebas de bombas nucleares en la estratosfera. Estos científicos afirman que el enfriamiento total es aproximadamente el doble del que se

puede explicar teniendo en cuenta sólo las explosiones nucleares y que, por tanto, la erupción del Agung debe de haber contribuido al enfriamiento en una cuantía igual a la de aquéllas. En otras palabras, el enfriamiento total es doble del efecto de Agung por sí solo: o bien, si se quiere explicar el efecto considerando sólo el Agung, se habría de suponer una influencia del volcán en el clima doble de la real. Esto concuerda bastante bien con los cálculos de Coakley: dejando aparte la contribución del Agung tal como predice la teoría, el resto de la influencia hallada por las observaciones australianas se puede explicar claramente por efecto de las bombas nucleares descrito por los investigadores rusos. Y dejando aparte el volcán humano y las propias pruebas nucleares, se pone de relieve la conclusión de que, en una escala de tiempo de decenios y siglos, los pequeños cambios climáticos se explican mejor que de ninguna otra manera mediante una combinación del polvo volcánico y las influencias solares en la estratosfera. Esto puede hacer felices a los teóricos, pero, como era de esperar, no nos proporciona una predicción más consoladora de la tendencia natural del clima en las décadas venideras.

Con la actividad volcánica normal, al parecer restablecida tras la quietud de las décadas en torno de 1940, hay ahora una influencia más, causante del enfriamiento. Con los posibles efectos solares, además de la probable contribución del volcán humano, es fácil ver por qué muchos climatólogos se han sentido preocupados últimamente por la perspectiva de un enfriamiento global continuado, y por qué, irónicamente, de ningún modo es obvio que una influencia tendente al calentamiento y debida a la actividad humana —el efecto invernadero del dióxido de carbono— tenga que ser considerada mala, al menos a corto plazo. Antes de entrar en detalle en el efecto invernadero global, hay aún otra influencia natural sobre el clima que merece mención. Puede que no actúe en una escala de tiempo significativa para la vida de una persona, y las pruebas todavía no son tan decisivas como las que hemos encontrado a favor de la teoría de cambios climáticos de Milankovič. Pero la notable historia del descubrimiento de

una relación entre el campo magnético de la Tierra y el clima, ambos variables, vale la pena de ser contada.

VII. EL ESLABÓN MAGNÉTICO

Un hombre menos decidido que Goesta Wollin podría haber abandonado sus estudios de las relaciones entre el geomagnetismo y el clima cuando su primera publicación, a principio de los años setenta, fue recibida con frialdad por la mayor parte de la comunidad científica. Los geofísicos destilaron sarcasmo sobre su idea de que una correlación entre los cambios climáticos y las variaciones en el campo magnético terrestre podrían ser algo más que una mera coincidencia o una chiripa estadística. Sin embargo, sus detractores deberían de haberse dado cuenta de que un hombre que. siendo súbdito sueco, se había alistado voluntario en el ejército norteamericano para luchar contra Adolf Hitler, y cuya primera experiencia como paracaidista fue lanzarse en Normandía la noche *antes* del día D. como miembro del Servicio de Inteligencia de la 82.ª División Aerotransportada, no se iba a desanimar por unas cuantas críticas académicas. La historia de Wollin —y la del eslabón entre el campo magnético terrestre y el clima— merece ser contada por derecho propio. No obstante, se trata de un campo de investigación de gran actividad en la ciencia actual, y es imposible detallarlos con el mismo sentido de satisfacción con que se explicaba, por ejemplo, la teoría de los ritmos climáticos de Milankovič. Lo que decimos aquí tiene por objeto mostrar el afán de progreso en la investigación, en especial en un campo tan multidisciplinario como es el estudio del clima, antes que para dar la impresión de que las ideas son definitivas. Algunas personas pueden argüir que el debate científico debería mantenerse dentro de los centros académicos —y en los artículos de las revistas científicas— hasta que todos los puntos se hayan puesto sobre las íes: pero si los trabajos de divulgación tratasen sólo de lo que ha sido ya plenamente comprobado y confirmado, nos perderíamos aquello que hace emocionante la ciencia, los nuevos descu-

brimientos y las nuevas ideas. Las relaciones entre el magnetismo y el clima están lo bastante bien establecidas como para que esta historia pueda contarse: lo que no ha sido determinado de manera satisfactoria para nadie es el funcionamiento de estas relaciones. Pero incluso el progreso logrado hasta ahora constituye una saga de moderno esfuerzo científico.

Rememorando hoy la controversia que él mismo provocó. Wollin disfruta evidentemente con el relato: sin embargo, le ha costado diez años de intenso trabajo y a veces de ásperas disputas académicas —una de las cuales lo llevó al borde del colapso nervioso— establecer la realidad de las relaciones entre el geomagnetismo y el clima. Wollin subraya la importancia de la distinción entre el hecho —ahora establecido más allá de toda duda razonable— de que las variaciones magnéticas y climáticas están correlacionadas, y la hipótesis, todavía provisional, propuesta para explicar la correlación. Como ha ocurrido con otras sugerencias, el último «mecanismo» hipotético puede mostrarse erróneo, aun cuando hoy parezca correcto: pero si se demostrase erróneo, ello sólo significaría que debemos seguir buscando el mecanismo real, no que la correlación no sea real.

Aunque la idea de una relación entre el geomagnetismo y el clima datan, por lo menos, de treinta años atrás, la versión actual de aquélla comenzó con un descubrimiento fortuito de Wollin en 1970. Wollin había estado trabajando durante veinte años en la Columbia University de Nueva York, con David «Eric» Ericson, entre otras cosas, sobre un estudio de cambios climáticos a largo plazo en el Pleistoceno, el más reciente de los períodos glaciales. En 1970 pusieron atención por primera vez en los cambios climáticos a corto plazo, lo que a esta escala de tiempo significa los ocurridos durante los 11.000 años más o menos desde el final de la última glaciación. Su técnica estaba basada en el análisis de la abundancia de los restos de criaturas llamadas foraminíferos en los sedimentos de lagos o fondos oceánicos. Los foraminíferos son diminutos animales marinos que flotan cerca de la superficie del agua y, al morir, dejan su concha en los sedimentos; las diversas especies prefieren diferentes temperaturas del agua, por lo

que, mediante el penoso método de contar conchas a través de un microscopio, los investigadores pueden elaborar una guía fidedigna de la temperatura del agua en la época en que florecía una comunidad particular de criaturas. Por supuesto, el análisis de isótopos del oxígeno en las conchas calcáreas de los sedimentos da también una idea de la temperatura; se trata de la técnica empleada por el equipo de Lamont Doherty, que proporcionó la importante y convincente prueba de la presencia de los ritmos de Milankovič en la pauta de comportamiento climático de la Tierra en el pasado reciente. No es nada sorprendente que Wollin y sus colegas, que utilizan técnicas del mismo tipo para abordar problemas semejantes, se encuentren también en el Lamont-Doherty Geological Observatory, perteneciente a la Columbia University. Lo que sí sorprende es que los primeros esfuerzos de Wollin y Ericson por explicar los recientes cambios climáticos fructificasen al mismo tiempo que los geofísicos iban descifrando los detalles de las variaciones del campo magnético terrestre durante el mismo período de tiempo.

En abril de 1970, justo cuando Ericson acababa de trazar su serie de curvas de temperatura para los 11.000 años anteriores, un equipo de investigadores encabezado por V. Bucha publicó en *Science* una curva que mostraba los cambios de intensidad del campo magnético terrestre durante los pasados 9.000 años. Wollin cuenta que había regresado de una estación de esquí de la parte más septentrional de Vermont, a 650 km de su casa, y, cansado del viaje, hojeaba el último número de *Science* cuando se fijó en la curva de Bucha. Le pareció familiar, e, incapaz de dormir, se llevó el número de *Science* al Old Core Laboratory, donde trabajaba con Eric. Era un paseo de veinte minutos. Allí comparó la curva de *Science* con las seis gráficas sobre las variaciones climáticas que Eric había trazado, usando datos de distintas muestras de sedimentos. Sin embargo, estaba exhausto, como ahora admite con pesar, y no halló ninguna concordancia entre ellas y la curva magnética. A las siete de la mañana se hartó de mirar las fluctuantes curvas y se echó a dormir en el suelo del laboratorio. A las nueve llegó Eric para trabajar y lo despertó. Wollin

empezó a contarle su viaje a Vermont, pero de pronto se detuvo. Acababa de darse cuenta de por qué la curva de *Science* le había parecido familiar: ¡era la imagen especular de las curvas climáticas de Eric!

Como dicen muchos científicos, a menudo con un problema más complejo que éste, «dormirlo» realmente ayuda a encontrar la solución. La mente inconsciente parece que sigue haciendo frente al problema mientras la mente consciente duerme, y de pronto, al despertar, aparece la respuesta. No obstante, las coincidencias engañosas son la ruina de los científicos, y, muchas veces, bellos pares de curvas que parece que concuerdan exactamente en un conjunto de datos, resulta después que no tienen nada que ver la una con la otra. En este caso, la concordancia era asombrosa una vez invertida la curva magnética; pero Wollin y Ericson necesitaban muchos más datos para someter a prueba la relación implícita de que, cuando el campo magnético terrestre es más *débil*, la Tierra está más *caliente*. Habría sido muy fácil, considerando su cansancio en aquellos momentos, que Wollin hubiera descartado la aparente correlación como una coincidencia en la que no valía la pena insistir, pero, en lugar de ello, él y Ericson prosiguieron las investigaciones, haciendo el saque de honor de lo que ha de mostrado ser un nuevo juego de pelota en los estudios climáticos.

ESLABONES EN LA CADENA

Para sentar las bases del nuevo trabajo se utilizaron varias técnicas diferentes, en parte gracias a que los geólogos y los geofísicos con un amplio campo de intereses trabajan juntos en Lamont. En 1970, los geofísicos sabían ya que la polaridad del campo magnético terrestre varía de vez en cuando, con los polos magnéticos norte y sur cambiando de signo Estos cambios de polaridad son revelados por el magnetismo fósil en las rocas formadas hace mucho tiempo, porque los sedimentos que contienen rocas magnéticas se alinean con el campo magnético terrestre mientras se están formando, de modo que,

una vez se han solidificado, su magnetismo remanente proporciona un valioso registro del campo magnético de la Tierra en la época en que se depositaron. Diferentes sedimentos de distintas edades se combinan para dar un panorama del cambiante magnetismo terrestre.

Los estudios del magnetismo fósil en las rocas de los fondos oceánicos fueron de suma importancia al establecer la realidad del ensanchamiento de los fondos oceánicos y de la tectónica de placas —deriva continental— a principios de los años sesenta. Wollin y sus colegas estaban más interesados en los cambios de intensidad y polaridad del campo magnético revelados por el archivo de las rocas que en el proceso de extensión de los fondos marinos, pero, merced al trabajo realizado en relación con el desarrollo de las ideas de la tectónica de placas, disponían de una gran riqueza de material obtenido para estudios de fondos oceánicos que podían emplear en sus investigaciones.

En su trabajo con Ericson. Wollin había elaborado, mediante las inversiones de polaridad magnética como calendario, una detallada escala de tiempo frente a la cual podían compararse los sucesos geológicos de los pasados dos millones de años: el Pleistoceno La pauta de inversiones magnéticas aparece en buenas muestras de roca magnética de forma tan clara e inequívoca como una huella dactilar o una secuencia de anillos de árbol. Una vez se ha datado tal «huella dactilar» usando una sucesión de rocas bien conocidas de un lugar terrestre, la presencia de la misma pauta, por ejemplo, en el magnetismo de sedimentos de fondos oceánicos, revela exactamente cuándo fueron depositados dichos sedimentos. En 1970, este calendario magnético del Pleistoceno estaba ya bien establecido: pero la evidencia de una relación entre el magnetismo y el clima provino de un período mucho más corto del pasado reciente, sólo unos pocos miles de años. Para comprobar las consecuencias. Wollin y Ericson necesitaban el equivalente de un peine de púas finas, y el que hallaron fue el archivo isotópico de las variaciones de temperatura del casquete de hielo groenlandés debido a Willi Dansgaard. El cilindro proporcionaba una imagen de la relación a lo largo de

los pasados 11.000 años; pero cuando Wollin y Ericson trataron de llenar el hueco entre esa serie y sus estudios de los pasados millones de años tropezaron con el primer obstáculo De acuerdo con las mejores pruebas geofísicas disponibles en 1970, parecía que no había habido inversiones geomagnéticas durante los pasados 700.000 años, época de considerables fluctuaciones climáticas (como ya hemos visto en anteriores capítulos), la cual, si la teoría magnética era válida, debió también de ser una época de variabilidad magnética.

Así quedaron las cosas hasta agosto de 1970, en que, merced a un encuentro casual con William Ryan, estudiante de doctorado. Wollin se enteró de que la tesis doctoral de aquél consistía en un estudio de las inversiones magnéticas durante los pasados 470.000 años: en este período Ryan había hallado, a partir de dos muestras de sedimentos, evidencias de cinco inversiones magnéticas de corta duración. Además, una de esas muestras, procedente del Caribe, era una de las que Ericson ya había usado para su análisis climático. La curva de las fluctuaciones magnéticas de Ryan y la curva de las fluctuaciones climáticas de Ericson, deducidas de la misma muestra, concordaban exactamente; Ryan y su colega John Foster pronto ingresaron en el equipo.

Durante los meses siguientes, los cuatro trabajaron con ahínco en el proyecto, dando a la muestra del Caribe, como dice Wollin, «el papel estelar». Esta les proporcionó variaciones correlacionadas de cuatro variables distintas: la intensidad del campo magnético terrestre, su inclinación, la temperatura deducida de los isótopos del oxígeno y la temperatura deducida de las conchas de los foraminíferos. Las curvas de este estudio concordaban también con datos de muestras similares del Pacífico y del Mediterráneo, extendiendo la red alrededor del mundo (fig. 7-1).

Con lo que parecía justificado orgullo, el grupo envió a *Science*, en marzo de 1971, un artículo en que daban cuenta de sus resultados. Su sorpresa cuando les pidieron revisar el artículo para responder a las objeciones de un censor sólo fue comparable a su consternación cuando el artículo revisado fue rechazado. Sin embargo, estas cosas ocurren en el campo de

la ciencia, y Wollin envió la versión original a otra revista, *Earth and Planetary Science Letters*, en la que fue inmediatamente aceptada sin modificaciones y publicada a su debido tiempo. Mientras tanto. Wollin había vuelto a tener noticias de *Science* en circunstancias que hoy recuerda con abierta satisfacción.

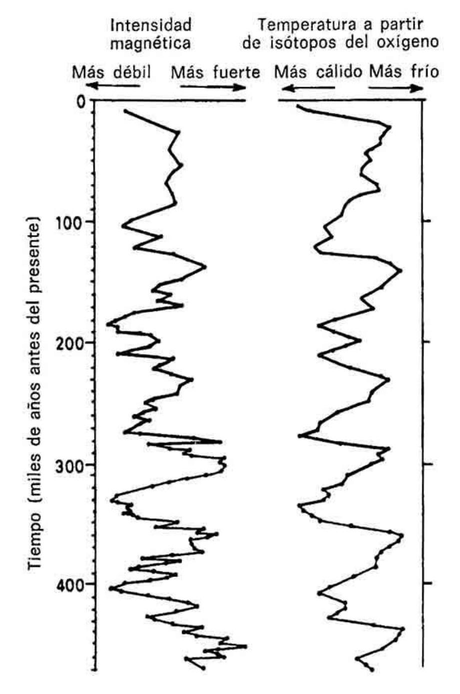


Fig. 7-1. Una única muestra perforada del fondo del Caribe proporcionó al equipo de Lamont una comparación directa de las variaciones del campo magnético terrestre y de los cambios de temperatura durante casi medio millón de años. La correlación es inequívoca.

Al mismo tiempo que envió la versión original del artículo a *Science*, Wollin mandó una copia del mismo al eminente climatólogo Cesare Emiliani, de Miami. Emiliani había realizado el trabajo pionero en la década de 1950, cuando utilizó por primera vez como indicadores climáticos los estudios de

los foraminíferos en los sedimentos. Al día siguiente al de la aceptación formal del artículo en *Earth and Planetary Science Letters*. Emiliani telefoneó a Wollin para informarle sobre una conversación que acababa de tener con John Ringle, entonces editor de *Science*. Emiliani había llamado a Ringle para preguntarle cuándo se publicaría el trabajo de Wollin. Ericson. Ryan y Foster: sorprendido al saber que había sido rechazado (¡dos veces!). Emiliani comunicó a Ringle que se trataba de un artículo muy importante y que *Science* debería publicarlo. En vista de lo cual. Ringle envió una carta a Wollin invitándole a presentar de nuevo su manuscrito. «Debo decir» —recuerda Wollin— «que fue un placer llamar a Ringle para decirle que mis colegas y yo no estábamos interesados en remitirle el manuscrito».

CONTROVERSIA CRECIENTE

Esto no era ni mucho menos el final de sus dificultades. El incidente de *Science* ilustraba lo que iba a ser un tema constante: los geofísicos rechazaban las relaciones magnetismo/clima como coincidencias, mientras que muchos climatólogos vieron con buenos ojos la evidencia de que las variaciones climáticas pudieran estar vinculadas a otros fenómenos geofísicos. La controversia se agudizó porque el mecanismo originalmente propuesto para la relación no resistía un examen serio. El grupo de Wollin argumentaba que, tal vez, cuando el campo magnético es más débil y, por tanto, más rayos cósmicos pueden penetrar en la baja atmósfera, éstos actúan calentando la Tierra. No sólo nadie ha hallado una razón física satisfactoria para que esto se cumpla, sino que los más recientes estudios de Kondratyev y Nikolsky sugieren que tal efecto, si es que hace algo, tendría que actuar en sentido opuesto: un campo magnético con protección reducida contra los rayos cósmicos debe de producir efectos similares a brotes muy intensos de actividad solar; es decir, un *enfriamiento* del globo. Los teóricos que tratan de descifrar estas relaciones han de enfrentarse con un auténtico rompecabezas.

No obstante, la dificultad para explicar los hechos no invalida los propios hechos.

Ante la oposición, a veces hostil, de los geofísicos especializados en el estudio del magnetismo terrestre, el grupo de Wollin amplió sus correlaciones entre magnetismo y clima para cubrir en detalle dos millones de años del archivo del Pleistoceno. Al mismo tiempo, muchos climatólogos, entre ellos algunos de Lamont, estaban inmersos en estudios que iban a establecer más allá de toda duda razonable la importancia de los ciclos de Milankovič para el clima del Pleistoceno. Entre tanto, al otro lado del Atlántico, un científico solitario aportaba enigmáticas evidencias de la realidad de relaciones entre el geomagnetismo y el clima operando en escalas de tiempo mucho más cortas.

Joe King es un investigador del Appleton Laboratory del Reino Unido, centro destinado principalmente al estudio de la ionosfera y del modo de propagación de las ondas radio alrededor del mundo; pero King es uno de esos raros pájaros científicos cuya trayectoria ha resultado tan brillante que, incluso dentro de los confines de un laboratorio oficial, como funcionario científico, tiene lo que se llama un destino de «mérito especial», que le da libertad para ir a la búsqueda de temas de investigación interesantes y potencialmente importantes[10]. El camino que siguió a principios y mediados de la década de 1970 le llevó desde un interés en los efectos de la actividad solar sobre el tiempo, incluyendo tal vez el campo magnético terrestre (lo que no estaba muy lejos de los principales intereses del Appleton Laboratory) al rompecabezas de las relaciones entre la forma e intensidad del campo magnético y el tiempo y el clima en la Tierra. Como hemos visto, la llegada de los rayos cósmicos procedentes del Sol y la Galaxia perturban tanto la radiopropagación como el tiempo. Sin embargo, en su ruta dentro de la atmósfera los guía el campo

[10] En la década de I960, antes de fundar la Climatic Research Unit (Unidad de investigación climática) en la University of East Anglia. Hubert Lamb tenía también un destino de «mérito especial» en el Servicio Meteorológico británico.

magnético, de modo que no hizo falta mucha intuición para tratar de ver cómo se comparan las configuraciones del campo magnético terrestre con las de la circulación de la atmósfera. Lo sorprendente es que concuerdan casi perfectamente.

El campo magnético de la Tierra no es tan sencillo como el de una barra imantada, y, en particular, en el hemisferio norte actual hay una especie de doble «polo norte» magnético o un polo magnético de doble lóbulo. Uno de esos lóbulos del doble polo coincide casi exactamente con el centro de baja presión que domina la circulación atmosférica sobre el Atlántico Norte, y tal vez por esta razón, como muestran muchos estudios, tales latitudes son especialmente sensibles a variaciones en la actividad solar. Lo realmente curioso, sin embargo, es que la configuración de la circulación atmosférica, que se puede cartografiar trazando las líneas de igual altura de la superficie isobárica de 500 hectopascal[11], tiene también una estructura de doble lóbulo que casi se superpone a la estructura del campo magnético. (Véase capítulo 3, fig. 3-5.)

King concluyó que esto no podía ser una coincidencia, sino que debía de representar una relación de causa y efecto, con las líneas del campo magnético terrestre forzando de alguna manera las configuraciones de la circulación en una delineación similar. Acuñó (tal vez algo prematuramente) el nombre «magnetometeorología» para el estudio de éste y otros fenómenos relacionados, y desarrolló la idea señalando que tanto la configuración del campo magnético como la de la circulación parece que derivan de este a oeste alrededor del globo en la presente época geológica. La deriva hacia el oeste del campo magnético es un hecho bien conocido; King identificó la deriva hacia el oeste del clima, en particular, en el modo en que las sucesivas olas de frío (entre ellas, tal vez. la «pequeña glaciación») parece que se desarrollaron en China y

[11] La unidad de presión en el sistema internacional (S I.) vale un newton por metro cuadrado y se llama pascal El hectopascal vale 100 pascal y coincide con el antiguo milibar *(N. del T)*.

Japón y se desplazaron a través de Rusia hasta Europa durante tiempos históricos.

El tema de la magnetometeorología no ha tenido mucho éxito. Los meteorólogos no confían demasiado en el lado magnético, mientras que los científicos interesados en la magnetosfera no le prestan gran atención al tiempo. Es cierto que en *Nature,* en enero de 1974. Hubert Lamb comentó que «los fuertes indicios de asociación que King ha señalado no deberían dejarse de investigar», pero, en general, así ha sido y ahí quedó la cosa durante algún tiempo. A pesar de ello, todas las evidencias de relaciones entre el geomagnetismo y el clima confieren importancia a estudios como los del grupo de l.amont. En junio de 1974, en un artículo de puesta a punto en *Nature,* Peter Smith, de la universidad a distancia, resumió parte del entonces impresionante volumen de pruebas obtenidas por Wollin y sus colegas, incluyendo su ampliación de las correlaciones, mediante diferentes muestras de fondos marinos que cubrían hasta más allá de un millón de años en el pasado. «Otros autores también encuentran relaciones entre el magnetismo y el clima», decía Smith: «de ningún modo está claro que puedan ser fácilmente rechazadas».

El apoyo de Smith, proviniendo de un geofísico, fue muy bien recibido por Wollin, Ericson y los otros. Hacia mediados de los setenta trabajaron con ahínco para averiguar el modo de interacción del tiempo y el geomagnetismo en escalas temporales de años y decenios, en lugar de miles y millones de años; pero, desgraciadamente, esto quedó algo más allá de su alcance durante más de cinco años, tiempo durante el cual Wollin, Ryan y Ericson presentaron, casi como un subproducto, una nítida, si bien especulativa, idea que ligaba algunos de sus descubrimientos con el creciente éxito del modelo de Milankovič.

CAMBIOS MAGNÉTICOS Y CAMBIOS ORBITALES

A mediados de la década de 1970, el «peor» aspecto de la teoría de Milankovič era que resultaba «demasiado bueno

para ser verdad», es decir, que el ritmo de 100.000 años hallado en el clima era demasiado notable para que pudiera ser explicado sólo en términos de variaciones orbitales. Como se vio en el capítulo 4, este argumento queda debilitado por análisis más recientes de la realimentación que las corrientes oceánicas y los hielos marinos efectúan introduciendo energía en el ritmo largo de Milankovič. Wollin y sus colegas ofrecen una nueva explicación, que no contradice los otros modelos pero que puede actuar para reforzar aún más el efecto.

Recordemos que su descubrimiento clave era que las épocas de campo magnético *más intenso* correspondían a períodos más *fríos* en la Tierra. Nadie sabe por qué; tal vez el campo magnético más intenso canaliza los rayos cósmicos con mayor efectividad sobre las sensibles regiones polares y esto tiene algo que ver con ello. Cualquiera que sea la razón, lo que el equipo de Wollin deseaba era hallar una manera de modular el campo magnético terrestre en función de las variaciones de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, de modo que, cuando la órbita sea más elíptica, el campo magnético se debilite y la Tierra se caliente, coincidiendo con los ritmos de Milankovič en las muestras de sedimentos marinos de gran profundidad. Según todos los geofísicos, el campo magnético se produce a causa de movimientos fluidos en el núcleo eléctricamente conductor de la Tierra, y es más intenso cuando el fluido se mueve en régimen permanente, y más débil cuando los movimientos del núcleo se distorsionan.

¿Por qué se van a distorsionar los movimientos cuando la órbita de la Tierra alrededor del Sol es más elíptica? Dado que el núcleo líquido es más denso que el material que lo rodea (el manto), se mantiene fuertemente unido por la gravedad y forma una esfera más perfecta que la totalidad de la Tierra. El Sol y la Luna, tirando tanto del núcleo como del manto, crean mareas, desequilibrios entre ambos que podrían distorsionar el movimiento en el núcleo. En el caso de la Luna, las variaciones son regulares y rítmicas, de forma que una corriente estable se estabiliza pronto. Lo mismo ocurre con respecto al Sol, siempre que la órbita de la Tierra sea casi circular: pero cuando ésta es elíptica, el efecto de marea del

Sol sobre el núcleo y el manto es sensiblemente, distinto en un lado de la órbita (p. ej., en diciembre) y en el otro (julio). ¿Puede ser suficiente esta influencia variable para distorsionar la corriente del núcleo, debilitar el campo magnético e impulsar la parte caliente del ciclo de Milankovič? No creemos que sea posible. Todo encaja, pero la estructura resultante es artificial, y también bastante redundante, ahora que se han resuelto los detalles del mecanismo de realimentación de los hielos marinos. No hay razón por la cual, apoyado por esa realimentación, el ciclo de 100.000 años de Milankovič no dominase los patrones climáticos de los pasados dos millones de años cualquiera que fuese el efecto magnético: de hecho, sería realmente asombroso, teniendo en cuenta la complejidad de las fuerzas que actúan sobre la atmósfera, que la influencia magnética por sí sola —o cualquier otra influencia única— pudiera explicar todas las variaciones que se observan. La conclusión aquí, no obstante, es que, si bien las más radicales fantasías de los entusiastas de una teoría deben siempre acogerse con cautela, tampoco hay por ello que descartar todas las sugerencias de la misma procedencia. La última —y tal vez la mejor— idea del grupo de Lamont llegó sólo después que la excitación inicial y la controversia creada por las ideas anteriores se habían ya calmado, y Wollin, trabajando de nuevo en solitario, se había agotado hasta el borde del colapso.

LA PERSPECTIVA A CORTO PLAZO

Hacia finales de los años setenta, otros investigadores habían confirmado la realidad de la relación magnetismo/clima en una escala de tiempo de cientos a miles de años, e, incluso sin un mecanismo enteramente satisfactorio que explicara la relación, los geofísicos parece que aceptaron la cuestión como demostrada. Sin embargo. Wollin quería confirmar que la relación campo débil/tiempo cálido es válida incluso en una escala de tiempo importante para la predicción a lo largo de una vida humana, y que podía ser de gran utilidad. Como sus

colegas habían vuelto a sus propias líneas principales de investigación, en lo que el propio Wollin describe como un frenético esfuerzo solitario, construyó cientos de curvas para comparar los datos climáticos con la declinación magnética, la inclinación y las intensidades de las componentes horizontal y vertical del campo magnético de distintos puntos alrededor del mundo. Su depresión ante los repetidos fracasos llegó a ser tan grave, que lo convirtió prácticamente en un ermitaño, viviendo en la habitación de huéspedes de su propia casa y no tratando ya ni siquiera con su propia familia. Allí leyó una reseña del libro *Essays of E. B. White*, en la que el crítico describía cómo White se había curado de una depresión similar «trabajando con sus manos y tomando sorbitos de jerez».

Dispuesto a probar cualquier cosa de inmediato, Wollin volvió al Lamont Observatory, donde recogió la chatarra y desperdicios de los talleres para hacer lo que él llama «construcciones»: apenas artísticas para merecer el nombre de esculturas, tales construcciones pueden verse hoy dispersas por el jardín arbolado de su casa. Cuando dijo a sus colegas lo que pensaba hacer, Ryan se fue rápidamente a buscar el jerez. «White tiene razón» —me dijo Wollin—. «El trabajo manual y los sorbitos de jerez hacen su efecto. En tres semanas me había recuperado de la depresión, y en el laboratorio de Eric había cuatro botellas de jerez de un galón [casi cinco litros] vacías para el basurero». Con el tiempo, sus nuevos trabajos sobre el problema climático dieron fruto. La clave para el análisis a corto plazo resultó ser, no la intensidad del campo magnético ni ninguna de sus componentes, sino la velocidad de variación del mismo, tanto si aumentaba como si disminuía. Este es claramente un efecto distinto de la relación a largo plazo entre el magnetismo y el clima hallada por investigadores de todo el mundo. Wollin se había equivocado en sus intentos de demostrar que la relación campo magnético débil/tiempo cálido se aplica incluso de un año a otro y de una década a otra; pero sí descubrió que las grandes corrientes oceánicas del Pacífico, las cuales constituyen la mayor circulación acuática en la Tierra, son afectadas por las variaciones del campo magnético.

Una vez hallada la relación, fue fácil ver cómo operaba. El agua oceánica, cargada de sal, es un conductor moderadamente bueno de la electricidad, y su circulación crea débiles corrientes eléctricas, que interaccionan con el campo magnético de la Tierra mediante el efecto dinamo.

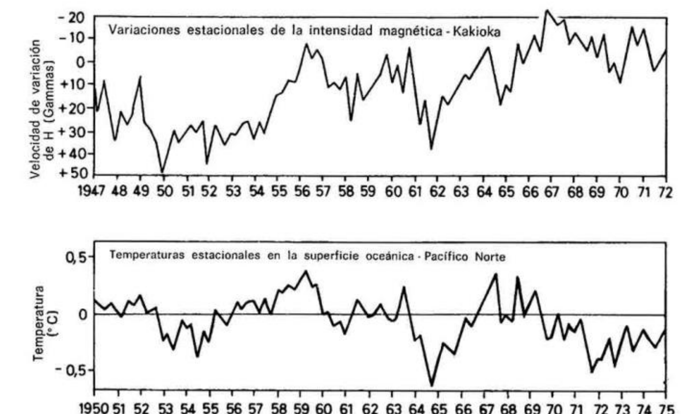


Fig. 7-2. A lo largo de las últimas décadas, las temperaturas de superficie del Pacifico Norte mantienen una estrecha correlación con la velocidad de variación del campo magnético terrestre, siempre que la curva de temperatura se desplace tres años, teniendo en cuenta el tiempo que tarda la atmósfera en responder a las variaciones del campo magnético. Los cambios de temperatura se miden con respecto a una referencia arbitraria.

La realimentación entre las corrientes oceánicas (de ambas clases) y el campo magnético terrestre suele encontrarse en equilibrio, pero cuando el campo magnético varía rápidamente afecta a la dinamo oceánica con la suficiente intensidad como para alterar, mediante la conexión electromagnética, la velocidad a la cual la gran corriente del Pacífico describe su giro en la fosa oceánica. Por analogía con el efecto dinamo, descubierto por Michael Faraday en el siglo XIX, un rápido aumento en el campo magnético debería producir el efecto opuesto, permitiendo que la circulación oceánica fluyera con mayor vigor y distribuyera el calor más por igual en torno del globo. Esta es precisamente la pauta de sucesos que Wollin halló, con las variaciones climáticas (temperatura) en latitudes

templadas y altas siguiendo, con unos tres años de retraso, las variaciones bruscas hacia arriba y hacia abajo del campo magnético.

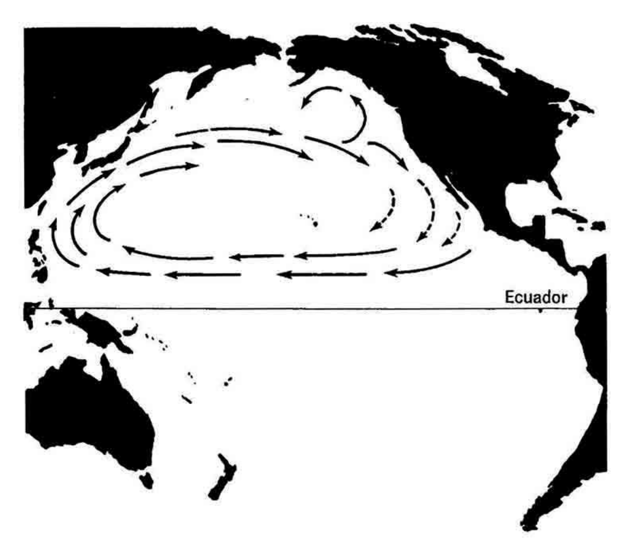


Fig. 7-3. Las relaciones entre las temperaturas del Pacifico y el cambiante magnetismo se explican por el efecto dinamo del gran remolino de corrientes oceánicas alrededor del Pacífico Norte.

Debido en parte a que Wollin sufrió una seria enfermedad mientras completaba su trabajo, éste todavía no se había publicado en el momento de escribir este libro, pero cuando sus resultados se hagan públicos causarán probablemente la misma controversia que produjeron sus artículos de hace diez años. Parece que hay aquí una base real para predecir, con tres o cuatro años de antelación, fluctuaciones de temperatura de medio grado más o menos por encima o por debajo del valor a largo plazo en zonas clave del globo para la agricultura.

Y con esto, hemos de abandonar la historia de Goesta Wollin y sus investigaciones acerca de las relaciones entre el magnetismo y el clima. Para quien crea que el tiempo cálido es realmente el más favorable, podemos hallar al menos una

pizca de consuelo en las medidas del campo magnético terrestre efectuadas por los satélites durante los años setenta. Tales medidas muestran que la intensidad del campo está decreciendo poco a poco, a razón de aproximadamente un 1% por década Si esta tendencia continúa, dentro de una generación, más o menos, los herederos espirituales de Wollin tal vez puedan hacer comprobaciones directas de la relación campo débil/Tierra caliente. Sin embargo, aparte de ese poco de consuelo, todos los datos fidedignos de los que disponemos sobre actividad volcánica, archivo histórico, manchas solares y rayos cósmicos, así como los ritmos de Milankovič, apuntan a que la Tierra se está enfriando. Lo está haciendo en diversas escalas de tiempo, y —lo más importante— en una escala esencial para la humanidad, retornando a una «pequeña glaciación» tras un calentamiento temporal. Frente a los antecedentes del cambio climático, la perspectiva de un efecto invernadero global inducido por el hombre puede no parecer alarmante, al menos para las próximas décadas, contrariamente a la opinión catastrofista.

Ya lo veremos. La gesta inacabada de los estudios de geomagnetismo y clima constituye, sin embargo, un puente enteramente adecuado entre el debate de las causas naturales del cambio climático y el del efecto invernadero antropogénico. La ciencia es rara vez categórica, con respuestas definidas para preguntas concretas, en especial donde intervienen complejos sistemas naturales como la máquina atmosférica. Cuando se añade la influencia perturbadora del hombre, entender y predecir el camino que seguirán esos sistemas naturales se convierte en una empresa casi imposible, que, de todos modos, es urgente llevar a cabo. Si se dejara a los científicos a su aire, la mayoría de ellos preferirían ni siquiera discutir en público el efecto invernadero, sino trabajar tranquilamente en el fenómeno durante otros veinte años o así, antes de llegar a conclusiones definitivas. Sólo la urgente necesidad de adoptar una política a escala global si la amenaza es real les ha obligado a salir a la palestra del debate público.

En la segunda parte de este libro expondré lo mejor que pueda los conocimientos sobre el efecto invernadero y los problemas que probablemente éste planteará: pero siempre hay que tener en cuenta que, por lo que respecta a los científicos, estamos todavía en los principios, y el cuadro es bastante menos claro que el esquema de la interacción del magnetismo y el tiempo (que está lejos de ser todavía una teoría científica concluyente), y, por supuesto, mucho menos claro que la idea que ahora tenemos de los ritmos climáticos más importantes de la época presente, los ciclos de Milankovič. Las teorías sobre el efecto invernadero no son perfectas: pero son lo mejor que tenemos, y necesitamos alguna base para hacer planes en un mundo hambriento.

SEGUNDA PARTE

EL EFECTO INVERNADERO GLOBAL

VIII. LA VIDA Y EL EFECTO INVERNADERO GLOBAL

Hace poco tiempo que el efecto invernadero ha pasado a primera plana, y, por lo que nos cuentan bajo los grandes titulares de periódicos y revistas parece que se trata de algo nuevo en la historia de la Tierra, un efecto secundario de las actividades humanas. Sin embargo, el efecto invernadero ha tenido en realidad una importancia clave durante la larga historia de nuestro planeta y ha contribuido de forma esencial a las condiciones que hacen posible la vida en la Tierra. Nuestro planeta hermano. Venus, situado sólo un poco más cerca del Sol que la Tierra, es hoy un desierto supercaliente a causa de un efecto invernadero natural pero sin freno, producido por su espesa atmósfera de dióxido de carbono; la Tierra está dotada de agua y de una tenue atmósfera, ideal para albergar la vida. Las diferencias dependen enteramente del equilibrio de los efectos invernadero que actúan en los dos planetas, y el origen de tales diferencias se remonta a los primeros tiempos de la formación del Sistema Solar, hace más de cuatro mil millones de años. El efecto invernadero debido al hombre (antropogénico) constituye sólo una fase menor y transitoria en esa escala de tiempo, independientemente de lo importante que sea para la humanidad.

¿Qué es exactamente el efecto invernadero? La Tierra, al igual que los demás planetas, está caliente sobre todo porque recibe calor del Sol. Un poco de calor escapa del interior de nuestro planeta, pero representa una pequeña fracción si lo comparamos con la energía calorífica que nos llega del Sol. Para alcanzar la superficie de la Tierra, esta energía ha de pasar a través de la atmósfera, y lo hace con facilidad. La mayor parte de la energía emitida por el Sol está comprendida en una banda de longitudes de onda desde 0,4 a 0,7 micras (millonésimas de metro, o milésimas de milímetro), que se

conoce como región visible. Nuestros ojos han evolucionado, a lo largo de cientos de millones de años, para hacer uso de esta energía solar radiante, de modo que no ha de sorprendernos descubrir que gran parte de la energía solar se radia en la región visible. Las más cortas de esas longitudes de onda son de color violeta, y las más largas, de color rojo, y entre ambas se halla la totalidad del espectro visible: el arco iris; en total, aproximadamente el 46% de la energía solar corresponde a la luz visible.

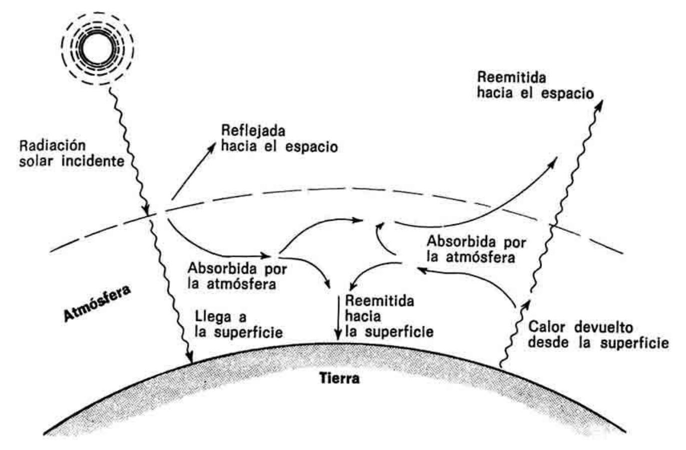


Fig. 8-1. El efecto invernadero. Alrededor del 40% de la radiación solar incidente es reflejada otra vez hacia el espacio, el 15% lo absorbe la atmósfera, y el 45% aproximadamente llega a la superficie de la Tierra, donde con el tiempo es reemitida en forma de radiación infrarroja (calorífica). Parte de ésta es a su vez absorbida en la atmósfera y reemitida de nuevo hacia |a superficie, lo cual mantiene a la Tierra más caliente de lo que estaría sin atmósfera.

Alrededor del 7% de la energía solar es radiada a longitudes de onda más cortas (por debajo de 0,4 micras) llamadas ultravioleta. Y el resto, las longitudes de onda largas (por encima de 0,7 micras), se denomina infrarrojo, término sinónimo de energía radiante calorífica. Cuando se ponen las manos cerca de un radiador caliente y se nota el calor, aun cuando el radiador no arde visiblemente, lo que se siente es la radiación infrarroja. Es precisamente una coincidencia que la atmósfera terrestre sea transparente para la mayor parte de la

energía radiante del Sol, en la región visible: en otros planetas existen capas nubosas a gran altura en la atmósfera, las cuales bloquean el paso de la radiación solar incidente, impidiendo que alcance la superficie. Pero la vida necesita energía, de modo que otra vez nos damos cuenta de que vivimos en un planeta cuya atmósfera es transparente para la mayor parte de la energía emitida por la estrella alrededor de la cual describe su órbita. Sin embargo, casi toda la radiación ultravioleta del Sol es absorbida a gran altura en la atmósfera por moléculas tales como óxidos de nitrógeno, oxígeno y ozono, la forma triatómica del oxígeno. Esto es esencial para la vida en la superficie del planeta, ya que la radiación ultravioleta daña las células, rompiendo la molécula vital. DNA; la pequeña cantidad de radiación solar ultravioleta que logra llegar al suelo puede causar quemaduras cutáneas y algunas formas de cáncer de piel.

Parte de la radiación infrarroja es también absorbida en la atmósfera, principalmente por el vapor de agua y el dióxido de carbono. El resto llega al nivel del suelo, junto con casi toda la radiación visible del Sol, y calienta la superficie de los océanos, la tierra firme y la vegetación que la cubre. Como consecuencia de ello, la superficie caliente del planeta radia a su vez energía hacia el espacio. En promedio, la cantidad de calor radiada por la Tierra hacia el espacio ha de compensar la cantidad de calor recibida del Sol; si, por obra de magia, fuera posible hacer el Sol un poco más caliente, entonces llegaría más energía a la superficie de la Tierra, de modo que el planeta se calentaría ligeramente y radiaría una mayor cantidad de calor hacia el espacio, estableciéndose así un nuevo equilibrio. No obstante, dado que la Tierra está mucho más fría que el Sol, radia su energía a longitudes de onda mucho más largas, casi enteramente en la región infrarroja del espectro desde unas 4 micras hasta más de 30 micras. La energía alrededor de 8 a 12 micras escapa fácilmente hacia el espacio; pero la mayor parte de la restante es absorbida en la atmósfera por vapor de agua, dióxido de carbono y pequeñísimas cantidades de otros gases. El resultado es que la atmósfera cerca de la superficie de la Tierra se calienta; éste es el

efecto invernadero atmosférico. Con el tiempo, la atmósfera caliente radia su propia energía infrarroja, parte de la cual escapa al espacio y parte va hacia abajo para calentar el suelo y ser radiada de nuevo. Los dos efectos fundamentales de la atmósfera sobre la energía radiante son la absorción de la radiación solar ultravioleta incidente, que de otro modo dañaría la vida en la superficie de la Tierra, y la retención de parte de la radiación infrarroja que escapa al espacio, con lo cual mantiene caliente la superficie. Sin embargo, la atmósfera no siempre ha sido así.

LA ATMÓSFERA EN EVOLUCIÓN

La Tierra y sus planetas vecinos, Venus (un poco más cercano del Sol) y Marte (el planeta siguiente al nuestro en orden de distancia al Sol), se formaron, como el mismo Sol y el resto del Sistema Solar, hace unos 4.500 millones de años. Los planetas se desarrollaron a partir de un disco de gas y polvo que envolvía al joven Sol, algo parecido a los anillos de Saturno actuales, pero en una escala mucho mayor. Algunas partículas de polvo en el sistema de anillos chocaban unas con otras y quedaban unidas, formando masas cada vez mayores de materia en órbita alrededor del Sol. Algunas de esas masas se hicieron tan grandes que su atracción gravitatoria empezó a dominar la región del espacio alrededor de cada una de sus órbitas, atrayendo otros fragmentos rocosos y constituyéndose en verdaderos planetas. A medida que los planetas en crecimiento barrían y limpiaban el espacio en torno suyo, eran también bombardeados por meteoritos; el aspecto picado que Mercurio y la Luna muestran actualmente da idea del bombardeo que todos los planetas recibieron en esos remotos días; en la Tierra (así como Venus y, en menor grado, en Marte) los cráteres han sido suavizados y alisados por la erosión.

Cada uno de los jóvenes planetas era una bola ardiente de rocas fundidas, calentada por la liberación de energía cinética (energía de movimiento) al chocar los meteoritos, por la liberación de energía gravitatoria al comprimirse la bola rocosa

formando una esfera bajo la atracción de su propia gravedad, y por la liberación de energía nuclear al fisionarse los elementos radiactivos pesados para dar lugar a otros más ligeros en su interior. Sin embargo, en el primitivo Sistema Solar, los restos de gases que rodeaban los jóvenes planetas fueron barridos por los violentos y erráticos estallidos del Sol antes de su estabilización. Las actuales atmósferas de la Tierra. Marte y Venus deben de haberse originado por desprendimiento de gases de su interior en la actividad volcánica y por la vaporización producida por el impacto de meteoritos. No hay razón para creer que la mezcla de gases producida por el desprendimiento de gases del interior de la Tierra sea muy distinta hoy de la que se desprendió en la primitiva historia de nuestro planeta, de modo que los astrónomos y geólogos tratan de conocer la primitiva atmósfera de la Tierra (y de los planetas próximos semejantes, los planetas terrestres) investigando la mezcla de gases desprendida actualmente por los volcanes.

Resulta sorprendente, considerando la asociación de los volcanes con el fuego, que el principal «gas» desprendido por éstos sea vapor de agua. Diferentes clases de erupciones dan lugar a distintas mezclas de gases. Por razones obvias, la mayor parte de las medidas se han efectuado en erupciones de tipo hawaiano, más tranquilas; es bastante difícil medir los gases desprendidos en erupciones explosivas como la del monte St. Helens. Las cifras hawaianas probablemente no difieren mucho del promedio global. Muestran que, en términos de peso, el 64% del material volátil producido por los volcanes es vapor de agua, el 24% es dióxido de carbono, casi el 10% lo constituye el azufre, y algo más del 1,5%, el nitrógeno. El misterio es cómo esa mezcla, que ha ido escapando de los volcanes a lo largo de miles de millones de años, ha dado lugar a una atmósfera que está hoy constituida en el 78% de nitrógeno, en el 21% de oxígeno, y contiene sólo una pequeña cantidad de dióxido de carbono y alrededor del 1% de otros gases. Asimismo, ¿por qué Venus posee una atmósfera con el 97% de dióxido de carbono, y la de Marte contiene dióxido de carbono en un 95%, cifras mucho más plausibles

en términos de la mezcla volcánica de gases? La respuesta depende de una combinación del efecto invernadero y la presencia de vida en la Tierra.

Cuando las rocas de la superficie terrestre se enfriaron por debajo del punto de ebullición del agua, 100°C, las enormes cantidades de vapor de agua presentes en la primitiva atmósfera, así como las que eran desprendidas por los volcanes, empezaron a caer en forma de lluvia. Las pruebas geológicas muestran que hace 3.800 millones de años había agua líquida en la superficie de la Tierra. Los océanos de agua actuaron de dos maneras: proporcionaron una permanente fuente de humedad para la atmósfera, asegurando un ciclo hidrológico regular y manteniendo una gran parte de nuestro planeta cubierta de nubes blancas, y disolvieron grandes cantidades de dióxido de carbono, proporcionando un camino de escape para el dióxido de carbono de la atmósfera, que con el tiempo se depositó en rocas sedimentarias, como la caliza, rica en carbonato cálcico. Como resultado de ello, una atmósfera espesa y caliente, rica en vapor de agua, se convirtió en un océano global y una atmósfera más tenue y fría, todavía dominada por el dióxido de carbono.

En Venus, las cosas fueron bastante diferentes. Para empezar, como el anillo alrededor del Sol del que se formó Venus estaba mucho más próximo al Sol (41 millones de kilómetros más cercano que la Tierra), probablemente contenía menos agua desde el principio, porque el agua habría sido impulsada al exterior de la atmósfera por el calor del Sol. En segundo lugar, cuando el joven Venus se empezó a enfriar, su temperatura en la superficie debió de estabilizarse mucho antes que la de la Tierra a causa de su proximidad al Sol. Tomando la distancia media Tierra-Sol como una unidad astronómica, la de Venus al Sol es en promedio 0,72 unidades, y la de Marte es de 1,52 unidades. La regla empleada para calcular la temperatura de un planeta *sin aire* es que ésta es la inversa de la raíz cuadrada de su distancia al Sol. Así pues, a igualdad de otros factores, la temperatura de Venus debería haber sido $1/\sqrt{(0,72)} = 1,2$ veces la de la Tierra, y análogamente, la temperatura de Marte debería haber sido 0,8

veces la de la Tierra; en números redondos. Venus sería un 20% más caliente que nuestro planeta y Marte un 20% más frío. La temperatura media real de la Tierra hoy día es de 15°C; en Venus, la temperatura alcanza los 500°C, y en Marte varía desde unos –30°C hasta los frígidos –140°C de los polos en invierno. Las diferencias en *porcentaje* sólo se aplican a temperaturas medidas en la escala absoluta, o de Kelvin, y éstas son 288°K para la Tierra, más de 700°K para Venus y 230°K para Marte[12]. Marte, más o menos, es más frío que la Tierra en la cuantía «correcta», pero Venus es supercaliente. La deficiencia de agua en su primitiva atmósfera y el ligero exceso de calor solar fueron suficientes para asegurar que, desde los principios del Sistema Solar. Venus retuviera una espesa capa de dióxido de carbono en torno suyo, capa que ha aprisionado la radiación infrarroja y ha permitido que las temperaturas de la superficie se eleven debido a un efecto invernadero no compensado.

Sin una espectacular variación en la emisión del Sol, esto nunca podría suceder en nuestro planeta. En la Tierra existe un «termostato» incorporado que ha mantenido las temperaturas alrededor de un promedio de 15°C durante 3.000 millones de años. Si el Sol estuviera un poco más caliente, llegaría más calor a los océanos y se evaporaría una mayor cantidad de agua, originándose más nubes blancas y brillantes. Las nubes blancas reflejarían al espacio parte del calor solar sobrante, de modo que ayudarían a mantener la Tierra fresca. Por el contrario, si el Sol se enfriase un poco, habría menos evaporación, menor cantidad de nubes en el cielo, y una mayor proporción de la energía solar reducida alcanzaría el suelo, manteniéndolo caliente. Los océanos actúan como un amortiguador contra los extremos, tanto de calor como de frío; pero este amortiguador funciona a escala de tiempo geológica, no humana, por lo que no podemos suponer que nos protegerá del efecto invernadero antropogénico en el próximo siglo más o

---

[12] La conversión de Kelvin a grados centígrados se hace simplemente restando 273.

menos. Sin embargo, sí podemos estar seguros de que, independientemente de la cantidad de combustible fósil que quememos, o de lo completa que pueda ser nuestra destrucción de los bosques tropicales, la Tierra no llegará, por medio de un efecto invernadero descontrolado, a convertirse en un desierto como el planeta Venus.

La estabilidad de la temperatura de la Tierra durante 3.000 millones de años o más, revelada de forma inequívoca por las pruebas geológicas de la existencia de agua líquida a lo largo de la historia de nuestro planeta, es todavía más extraordinaria si tenemos en cuenta que, realmente, la emisión del Sol ha cambiado con el tiempo. Los astrónomos calculan que la emisión de energía solar ha aumentado en un 30% aproximadamente en los pasados 3.000 millones de años. Sin embargo, hace esos millones de años, la Tierra no era una frígida bola cubierta de hielo. La única explicación para esto es que el efecto invernadero ya actuaba entonces, manteniendo la superficie terrestre más caliente de lo que de otro modo habría estado. Los científicos que estudian nuestro planeta no están seguros de cómo actuaba el efecto entonces, pero muy probablemente, además del dióxido de carbono, había una influencia secundaria debida a la presencia de amoníaco. El amoníaco es un gas muy bueno como invernadero, al absorber la radiación infrarroja del suelo, y constituye uno de los componentes menores de la mezcla de gases volcánicos: una de las principales fuentes de ese 1,5% de nitrógeno, estando en el amoníaco (NH_3) cada átomo de nitrógeno unido a tres átomos de hidrógeno.

Apenas se duda de que el amoníaco intervino en otro importantísimo acontecimiento de la historia de la Tierra, la aparición de la vida. Experimentos realizados actualmente han demostrado que una mezcla de agua, dióxido de carbono, un poco de amoníaco y pequeñas cantidades de otros componentes producidos por la actividad volcánica puede ser estimulada por la radiación ultravioleta (que simula el primitivo Sol) o por chispas eléctricas (que simulan relámpagos en la primitiva atmósfera de la Tierra) para producir una sustancia viscosa y pegajosa, de color castaño oscuro, rica en la clase

de moléculas orgánicas que se cree que fueron las precursoras de la vida. Aunque nadie sabe con exactitud cómo comenzó la vida en la Tierra, efectivamente se arraigó en ella, y no es nada sorprendente que lo hiciera en un planeta con una atmósfera impregnada de dióxido de carbono sazonada con un poco de amoníaco. Desde entonces, la larga historia de la evolución de la atmósfera y la del desarrollo de la vida están estrechamente enlazadas.

LA VIDA Y EL OXÍGENO

Venus, un poco más cercano al Sol que la Tierra, se convirtió en la recalentada víctima de un efecto invernadero descontrolado. En Marte, algo más alejado del Sol que nosotros y demasiado pequeño para que su gravedad retuviera una atmósfera densa, el agua se congeló, y el planeta se convirtió en un gélido desierto. Por el contrario, en la Tierra, el primitivo dióxido de carbono ayudó a mantener el planeta lo bastante caliente como para que se formaran océanos de agua líquida, y en esos océanos se empezó a gestar la vida en condiciones que eran precisamente las adecuadas. A su vez, la vida en los océanos modificó la atmósfera de la Tierra hasta que empezó a parecerse a la atmósfera que hoy conocemos.

La presencia de tal cantidad de nitrógeno en nuestros días no es de ningún modo sorprendente, ya que el nitrógeno no forma fácilmente compuestos estables con otros elementos y tiende a permanecer sin combinar una vez que ha sido liberado en la atmósfera. Compuestos como el amoníaco son fácilmente despojados de su hidrógeno por procesos químicos —especialmente bioquímicos— que dejan el nitrógeno libre, y, a lo largo de 3.000 millones de años o más, ese 1,5% que escapa del interior del planeta ha tenido tiempo suficiente para incrementarse. Con el agua condensada en los océanos, y la mayor parte del dióxido de carbono encerrado en forma de carbonato en las rocas sedimentarias, el único cambio importante en la atmósfera de nuestro planeta en los pasados 3.000 millones de años ha sido la conversión del dióxido de carbono

restante en oxígeno. Sin embargo, este cambio es de extraordinaria importancia.

Las plantas son factorías químicas que fabrican glucosa, una fuente de energía para los seres vivos, y oxígeno, un producto de desecho, a partir del dióxido de carbono y el agua. Este proceso se conoce como fotosíntesis, porque sólo puede tener lugar en presencia de la luz (fotones). A diferencia de sus modernos descendientes, los primeros fotosintetizadores, que dominaron los océanos del mundo de 3.000 millones a menos de 2.000 millones de años atrás, no desprendían el oxígeno que producían a la atmósfera. Para ellos, el oxígeno era un veneno mortal, y sólo podían liberarse de él sin sufrir perjuicios encerrándolo en compuestos con hierro. El resultado fue la producción de capas de óxidos de hierro, conocidas como formaciones de hierro en bandas, que se hallan en los estratos geológicos de todo el mundo de algo más de 3.000 millones a 1.500 millones de años atrás. Sin embargo, hace de 1.800 a 1.500 millones de años, los depósitos de hierro cesaron conforme surgían nuevas formas de vida fotosintetizadora capaces de vivir con el oxígeno libre. En lugar de tener que recurrir al costoso proceso, en términos energéticos, de encerrar el oxígeno en moléculas con hierro, las nuevas formas de vida lo desprendían a la atmósfera, obteniendo además una gran ventaja en la lucha por la vida, ya que el oxígeno libre mataba a muchas de sus competidoras. A medida que aumentó la concentración de oxígeno libre, se depositaron muchas más capas altamente oxidadas de hierro en forma de sedimentos rojos —la Tierra se oxidó literalmente— y crecientes cantidades de dióxido de carbono quedaron encerradas en forma de carbonatos, compuestos que incluyen oxígeno extra así como dióxido de carbono.

Desde hace unos 1.000 millones de años, cada vez mayores cantidades de oxígeno en la atmósfera participaron en reacciones en las que intervenía la luz del sol (reacciones fotoquímicas), las cuales crearon la capa de ozono (oxígeno triatómico) en la estratosfera. La capa de ozono impidió después el paso de la radiación solar ultravioleta, y sólo a partir de ese momento hubo alguna posibilidad de que la vida salie-

ra de los mares y arraigara en tierra firme. Al mismo tiempo, el oxígeno libre en el aire abrió el camino para la evolución de la vida de los animales, que respiran oxígeno y lo utilizan para metabolizar alimentos y producir energía. Sin los fotosintetizadores no existiría la capa de ozono que nos protege de la radiación solar ultravioleta y no habría oxígeno para respirar. La explosión de restos fósiles de formas de vida complejas, el comienzo del período Cámbrico de los tiempos geológicos, coincide (si es ésta la palabra correcta) con el establecimiento de condiciones atmosféricas muy similares a las del presente, hace unos 600 millones de años. Desde entonces, la vida se ha diversificado y desplazado hacia la tierra firme bajo la protección de la capa de ozono y con una atmósfera constituida por nitrógeno (en el 78%), oxígeno (21%) y pequeñas cantidades de todo lo demás, incluido el dióxido de carbono. Hoy día, esa traza de dióxido de carbono constituye el 0,03% del peso de la atmósfera seca. Algunas pruebas geológicas sugieren que, en los pasados 600 millones de años, dicha concentración puede haber variado, por medio de causas naturales, entre 0,02% y 0,04% aproximadamente: éste es un modesto rango de fluctuación, pero abre el camino a interesantes especulaciones acerca de si, por ejemplo, una atmósfera ligeramente más rica en dióxido de carbono pudo haber contribuido tanto al calor del período Carbonífero, hace unos 300 millones de años (mediante el efecto invernadero), como al crecimiento de la vegetación de la que se alimentaban los dinosaurios de la época (gracias a la disponibilidad de una mayor cantidad de dióxido de carbono para la fotosíntesis por parte de las plantas). No se trata de especulaciones enteramente inútiles, ya que los restos fosilizados de esos bosques del Carbonífero, en forma de carbón, es lo que quemamos hoy día, causando por tanto un aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Los paleontólogos no pueden todavía dar respuestas concretas a esas preguntas especulativas, pero sí puntualizan que. incluso quemando todos los combustibles fósiles existentes, no hacemos más que devolver a la atmósfera el dióxido de carbono que acostumbraba estar en ella hace mucho tiempo, pero que ha sido

eliminado por las plantas al efectuar la fotosíntesis. Los esfuerzos del hombre no pueden, desde ese punto de vista, crear condiciones que no se hayan dado ya en la naturaleza durante los 600 millones de años pasados: *no* estamos en camino de un efecto invernadero incontrolado o del fin del mundo como habitáculo adecuado para la vida, sino simplemente, en el peor de los casos, de una variación menor y de corta duración, que tiene poca importancia en los 4.500 millones de años de la historia de la Tierra. Los problemas que puedan crearse para la humanidad a causa del efecto invernadero antropogénico son meros problemas humanos, los problemas temporales de una especie que sólo ha existido durante una mínima fracción de la historia de nuestro planeta. Esto puede consolar a cualquiera que tenga una mentalidad lo suficientemente amplia como para preocuparse más del bien de la vida en la Tierra que del bien de la especie particular de la que somos miembros. Sin embargo, desde el punto de vista de la mayoría de los seres humanos nos trae muchas preocupaciones al respecto. El oxígeno y el nitrógeno no absorben de forma notable la radiación infrarroja y, por consiguiente, no contribuyen al efecto invernadero. El dióxido de carbono sí lo hace, de modo que cualquier aumento de la concentración de dióxido de carbono es causa de preocupación.

EL AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO ANTROPOGÉNICO

La concentración actual de dióxido de carbono en la atmósfera, de aproximadamente 0,03%, suele expresarse como 300 partes por millón (ppm). El debate actual acerca del efecto invernadero se centra en recientes cambios de esta cifra, cambios que casi con seguridad han sido producidos por las actividades humanas. Cuando se queman combustibles fósiles se devuelve «carbono antiguo» a la atmósfera en forma de dióxido de carbono. Esto implica eliminar algo de oxígeno de la atmósfera, pero la cantidad de oxígeno presente en ésta (21%) es tan enorme comparada con la cantidad de carbono

que se quema y las cantidades de dióxido de carbono producidas (algunas partes por millón) que no representa amenaza concebible para la provisión de oxígeno necesario para respirar. Para apreciar esto en su justo valor, digamos que la atmósfera contiene 1.200 billones (millón de millones) de toneladas de oxígeno, y sólo 2.600 millones de toneladas de dióxido de carbono. Si toda la vida vegetal, incluyendo la vida unicelular en los océanos, sucumbiera mañana y cesara la fotosíntesis, todos moriríamos rápidamente y la Tierra quedaría sin vida. Sin embargo, ese oxígeno tardaría millones de años —un parpadeo en la escala de tiempo geológica— en combinarse con otros elementos, en especial hierro, carbono y azufre, y la atmósfera terrestre tardaría asimismo millones de años en adaptarse a la ausencia de vida. La asfixia *no* forma parte realmente del problema del efecto invernadero, aunque, como la igualmente mítica amenaza de un efecto invernadero descontrolado, ha sido aireada en las disparatadas teorías de los más extremados catastrofistas.

No hay duda de que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera está aumentando en la actualidad, y según parece, al menos en los pasados veinte años, este efecto se ha debido sobre todo a la quema de combustibles fósiles. El comienzo de este aumento data probablemente de la revolución industrial en Europa a finales del siglo XVIII, pero no hay medidas directas de la concentración de dióxido de carbono con anterioridad a unos cien años atrás, e incluso las medidas disponibles de la década de 1880 son inciertas y a veces contradictorias. Para formarse una idea del aumento del dióxido de carbono en el siglo XIX puede estimarse cuánto ha sido producido por actividades humanas.

Vale la pena recordar que los volcanes, en una escala de tiempo geológica, han desprendido alrededor de 100.000 veces la cantidad de dióxido de carbono que hay en la atmósfera hoy día, y este dióxido de carbono ha ido a parar a rocas tales como las calizas y las dolomitas. La cantidad de dióxido de carbono almacenado en las rocas sedimentarias de la Tierra es casi exactamente igual que la cantidad presente en la atmósfera de Venus, lo cual constituye una satisfactoria con-

firmación del papel del desprendimiento volcánico de gases en cada uno de esos dos planetas de tamaño similar. Una actividad humana, la fabricación de cemento, libera de nuevo a la atmósfera parte de este dióxido de carbono primitivo, a medida que la cal se extrae de la caliza, pero la actual producción de cemento es de unos 500 millones de toneladas por año (0,5 gigatoneladas, o 0,5 Gt) y ésta libera sólo unas 0,5 Gt de dióxido de carbono cada año. Aunque esta cifra parezca impresionante en comparación con las que se manejan en la vida cotidiana, es, como veremos, sólo aproximadamente el 3% de la cantidad de dióxido de carbono producida hoy día en la quema de combustibles fósiles, de modo que se puede ignorar en el presente debate acerca del efecto invernadero. A todos los efectos prácticos, las rocas carbonatadas (constituidas principalmente por carbonatos de calcio o de magnesio) proveen un depósito permanente de dióxido de carbono en la corteza terrestre.

Esto da cuatro depósitos entre los cuales el dióxido de carbono está intercambiándose continuamente en un equilibrio dinámico. Los combustibles fósiles son depositados, en el curso de las edades geológicas, extrayendo carbono del ciclo del dióxido de carbono. Nosotros los quemamos en una escala de tiempo mucho menor, devolviendo el dióxido de carbono a la circulación. La atmósfera proporciona el depósito de dióxido de carbono más importante con respecto al efecto invernadero, mientras que una parte se disuelve en los océanos, y una cierta cantidad de carbono se almacena en las plantas y animales vivientes (principalmente las plantas) de nuestro planeta, la biomasa.

Cuando se quema 1 Gt de carbono —por ejemplo, en forma de carbón— desprende aproximadamente 4 Gt de dióxido de carbono, ya que cada átomo de carbono se combina con dos átomos de oxígeno del aire. Entre 1850 y 1950 se quemaron unos 60 Gt de carbono en forma de combustibles fósiles, desprendiendo a la atmósfera unas 240 Gt de dióxido de carbono. Hacia finales de los años setenta, la entrada *anual* de dióxido de carbono en la atmósfera procedente de la quema de combustibles fósiles había alcanzado 20 Gt. Sin embargo,

parece que sólo la mitad de este dióxido de carbono permanece en la atmósfera hoy día.

La misma atmósfera contiene unas 700 Gt de carbono en forma de dióxido de carbono (es decir, unas 2.800 Gt de dióxido de carbono), y en la biomasa viviente hay unas 800 Gt. algo más que la atmósfera. Los restos orgánicos tales como el humus y la turba contienen probablemente al menos 1.000 Gt de carbono, y algunos cálculos triplican esa cantidad; hay incertidumbre y desacuerdo incluso entre los especialistas. El 50% del dióxido de carbono procedente de la quema de combustibles que, según parece, no se halla hoy en la atmósfera se disuelve probablemente en los océanos, donde el dióxido de carbono interacciona con los carbonatos disueltos para formar ion bicarbonato. El depósito disuelto contiene unas 40.000 Gt de carbono, pero sólo unas 600 Gt de éste se encuentra en la capas superficiales del océano, donde puede interaccionar fácilmente con la atmósfera La mejor estimación de la cantidad de carbono almacenada en el océano en forma de restos orgánicos, el equivalente oceánico del humus, es de 3.000 Gt. y frente a ello, la estimación de la cantidad total de carbono almacenada en los combustibles fósiles es relativamente modesta, de 12.000 Gt. Tal vez el 60% de éste sea accesible al hombre y se pueda quemar; sin embargo, de nuevo vemos que las actividades humanas no están causando cambios radicales en el medio ambiente, sino simplemente volviendo a poner en circulación una pequeña cantidad de carbono que había estado apartada temporalmente.

A largo plazo. 1.000 años como mínimo, los océanos son capaces de absorber el 80% o más del dióxido de carbono desprendido en las combustiones; pero el combustible se está quemando con mayor rapidez que aquella con que los océanos pueden disolver el producto final, y, en las décadas y siglos venideros, el aumento de la concentración de dióxido de carbono plantea un problema temporal de invernadero mientras los océanos se adaptan.

Las cifras exactas del incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se remontan sólo a 1957, cuando se inició un programa de control en un punto de la

montaña de Mauna Loa, en Hawái, a cargo de la Scripps Institution of Oceanography. Este lugar del océano Pacífico se halla alejado de toda fuente de contaminación industrial y resulta ideal para controlar las variaciones atmosféricas a gran escala. Las medidas de Mauna Loa muestran un constante ascenso en la concentración de dióxido de carbono durante 25 años (fig. 8-2). La cifra expresada en un principio para la concentración de dióxido de carbono en 1957 era 311 ppm; Bert Bolin, de la Universidad de Estocolmo, sugiere que una medida más precisa podría establecer esta cifra base en 315 ppm. En cualquier caso, la cifra superior a 335 ppm con respecto a 1980 es impresionante. Los problemas surgen cuando tratamos de seguir la pista de ese aumento hasta el siglo XIX.

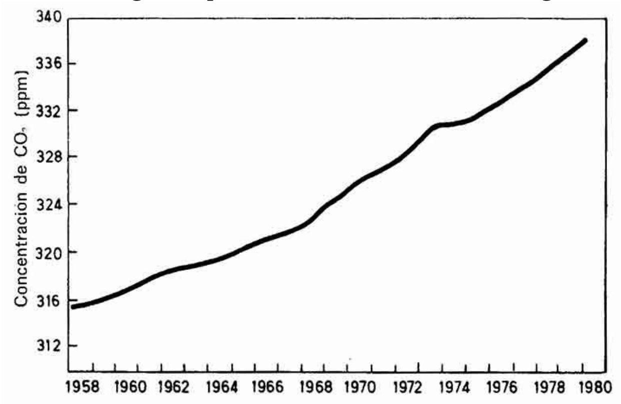


Fig. 8-2. Dejando aparte las variaciones estacionales, las medidas de Mauna Loa de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ponen de manifiesto el aumento de este gas productor del efecto invernadero a lo largo de las últimas tres décadas.

Aparte de conocer la cantidad de combustible quemado, hay una forma de calcular la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera durante el siglo pasado, estimando las cantidades de diferentes isótopos del carbono hallados en la madera de los anillos de árboles en distintos años. Además de la tendencia en gran escala, los registros de Mauna Loa muestran una variación estacional del dióxido de carbono,

que oscila arriba y abajo en 5 ppm, lo cual responde al efecto de las plantas que toman dióxido de carbono durante la primavera y el verano del hemisferio norte y lo desprenden cuando caen sus hojas y entran en el período de baja actividad del otoño y el invierno. Las plantas en crecimiento absorben el isótopo carbono 12 con preferencia al carbono 13, de modo que la proporción de carbono 13 es más baja en la biomasa que en la atmósfera. Las técnicas modernas son lo bastante sensibles como para medir la variación, a lo largo del año, en la proporción de los dos isótopos en el dióxido de carbono atmosférico de Mauna Loa, confirmando que las fluctuaciones estacionales son el resultado de la «respiración» de la biomasa.

EL PAPEL DE LOS BOSQUES

Técnicas similares aplicadas a los estudios de anillos de árboles deberían revelar la proporción de carbono procedente de combustibles fósiles y de madera quemada presente en la atmósfera en forma de dióxido de carbono durante cada año del siglo XIX. Además del carbono 12 y del carbono 13, los seres vivos contienen carbono 14, creado por la interacción de rayos cósmicos con nitrógeno en la atmósfera. Sin embargo, el carbono 14 se desintegra con una semivida de sólo algunos miles de años, y los depósitos de carbón tienen millones de años de antigüedad. De este modo, el combustible fósil no contiene nada de carbono 14. A medida que el combustible fósil se quema a lo largo de las décadas, diluye la proporción de carbono 14 en la atmósfera y, por tanto, la que pasa a formar parte de los anillos de los árboles: conforme la madera nueva se va quemando, altera la proporción de carbono 12 en la atmósfera, devolviendo el isótopo que previamente había sido escogido por las plantas al crecer: este efecto también tiene lugar con el combustible fósil. En principio, debería ser posible desentrañar estos efectos mediante delicadas medidas de la relación de isótopos del carbono en los anillos de árboles procedentes de madera del siglo XIX, y el profesor Minze

Stuiver, de la Universidad de Washington, ha emprendido una atrevida tentativa.

Desde principios del siglo XIX hasta mediados del siglo XX, los anillos de árboles muestran una gradual disminución del carbono 13. Stuiver interpreta esto como consecuencia del aumento en la proporción de carbono 12 a medida que los bosques iban siendo cortados y quemados, y estima que entre 1850 y 1950, la biomasa desprendió 120 Gt de carbono. Esta cifra re presenta el doble de la cantidad de carbono quemado en forma de combustible fósil durante el mismo intervalo, y la conclusión de Stuiver, algo controvertida, es que la tala de bosques dominó el crecimiento de dióxido de carbono en la atmósfera hasta mediados del presente siglo. Sus cifras implican una velocidad de aumento mayor que la sugerida por ningún otro experto, e indican que el valor inicial del cual partió este crecimiento en 1850 era de sólo unas 270 ppm. Las medidas de la concentración de dióxido de carbono en el siglo XIX dan resultados bastante más altos que las estimaciones de Stuiver basadas en los anillos de los árboles, y la mayor parte de los expertos están de acuerdo con aquellas cifras, argumentando que Stuiver ha cometido algún error en su técnica isotópica y que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera pudo haber sido ya de 290 ppm a mediados o finales del siglo XIX. Ésta es un área de gran incertidumbre, pero tiene suma importancia para el debate acerca del aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera porque, paradójicamente, si Stuiver tiene razón, parece que los océanos son todavía más eficaces en la absorción de dióxido de carbono de lo que se creía, y por tanto podríamos tener *menos* motivo de preocupación que en el caso contrario.

La idea de Stuiver de que entre 1850 y 1950 se produjo una cantidad doble de dióxido de carbono por la destrucción de bosques que por la quema de combustibles fósiles liga al menos con otros dos estudios. Uno, del neozelandés A. T. Wilson, concluye que, lejos de haber habido un constante aumento del dióxido de carbono, la mayor parte de él tuvo lugar en un gran brote entre I860 y 1890. Wilson, que tam-

bién utiliza anillos de árboles en sus estudios, relaciona este brote de producción de dióxido de carbono con la explosión de actividades agrícolas por parte de los colonizadores y con la tala de bosques en latitudes templadas que siguió a la apertura de tierras vírgenes en Norteamérica. Nueva Zelanda. Australia. Sudáfrica y el este de Europa por los ferrocarriles Si Wilson tiene razón, la biomasa contribuyó a producir, en un intervalo de 30 años, tanto dióxido de carbono como todo el combustible fósil quemado entre 1850 y 1950. Incluso sugiere que una variación tan espectacular —el aumento del contenido de dióxido de carbono de la atmósfera en un 10% en el curso de algunas décadas— pudo haber sido un factor de suma importancia en la subida de aproximadamente 0,5°C de la temperatura media global que nos sacó de la «pequeña glaciación» situándonos en las condiciones más confortables del siglo XX. Muy pocos climatólogos o expertos en isótopos apoyan las conclusiones de Wilson; pero, tenga o no razón, sirven de oportuno recordatorio de que el efecto invernadero y el calentamiento global pueden no ser tan desfavorables. Mucha gente estará de acuerdo en que el clima actual representa una mejora sobre las condiciones de la «pequeña glaciación», y cualquiera que sea la validez de la hipótesis de la «explosión agrícola de los colonizadores», el agradable tiempo del siglo XX puede, al menos en parte, ser debido a un efecto invernadero antropogénico.

El otro estudio que guarda relación con el trabajo de Stuiver pone al día esta especie de llamada de atención. Si la destrucción de los bosques pudo ser importante en el aumento de concentración del dióxido de carbono durante el siglo XIX, ¿cuánto podría contribuir a la acumulación en nuestros días, medida en unas 2 ppm por año? En 1977 y 1978, George Woodwell. Marine Biological Laboratory (Laboratorio de Biología Marina) en Woods Hole (Massachusetts), y Bert Bolin, en Estocolmo, dieron un nuevo enfoque a todo el debate del dióxido de carbono.

Las medidas en lugares como Mauna Loa dan en la actualidad una acumulación de dióxido de carbono aproximadamente equivalente a la liberación de 3 Gt de carbono, o un

poco menos, cada año. Sin embargo, en 1978 y 1979, las cantidades de combustible fósil quemado fueron de 5,1 y 5,4 Gt de carbono, respectivamente. Bastante más de 2 Gt de carbono —algunos años, más de 2,5 Gt— es absorbido por los océanos y otros procesos naturales, tal vez la formación de rocas calizas. Los oceanógrafos y los químicos oceanográficos dicen que los océanos no pueden absorber todo ese exceso, y hasta que Woodwell y Bolin lo echaron abajo, el argumento típico era que una buena proporción del dióxido de carbono extra era absorbida por la biomasa, estimulando a los bosques a un mayor crecimiento en vista de la disponibilidad de más dióxido de carbono para la fotosíntesis. Ahora parece que los bosques también pueden producir una entrada neta de dióxido de carbono en la atmósfera, exacerbando el problema. Woodwell y Bolin, de forma independiente, utilizaron cálculos de la cantidad de bosque que se destruía cada año a fin de obtener una cifra dela cantidad de dióxido de carbono que la biomasa arrojaba a la atmósfera. La estimación de Bolin fue de 1 Gt por año, y la de Woodwell, de unas 2 Gt por año, lo suficientemente próximas para sugerir que ambos estaban bastante cerca de la verdad. Otros estudios más recientes dan resultados parecidos, y hoy día suele estarse de acuerdo en que la biomasa podría muy bien dar una pe quena contribución neta al dióxido de carbono, pero no tan importante como las 5 Gt o más de carbono desprendidas de los combustibles fósiles cada año. La conclusión importante de todo este trabajo es que los «sumideros» de dióxido de carbono son más importantes de lo que las actuales teorías pueden explicar. De alguna manera, los océanos —u otra cosa— están absorbiendo más dióxido de carbono del que podemos explicar: pero no hay garantía de que continúen absorbiendo tanto si la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera sigue creciendo. Una persona optimista podría razonar que. si los sumideros son tan eficaces, un aumento del dióxido de carbono podría estimularlos a serlo aún más; un pesimista diría que, si han estado absorbiendo tanto dióxido de carbono, ahora deben de estar casi llenos y pueden ser incapaces de absorber los productos de una quema de combustibles fósiles siempre en aumento.

Situados entre ambos extremos, la mayor parte de los participantes en el debate del dióxido de carbono hoy día sólo pueden conjeturar la proporción de dióxido de carbono producido por las actividades humanas que probablemente quedará en la atmósfera en los años y décadas venideras. Durante veinte años, según sabemos por medidas directas, aproximadamente la mitad del dióxido de carbono debido a la quema de combustibles fósiles se ha ido acumulando en la atmósfera. La conjetura razonable es que los factores biológicos permanecerán igual durante los próximos veinte años y que todos los sumideros continuarán operando de la misma manera. Así pues, la regla para la predicción climática es que aproximadamente la mitad del dióxido de carbono desprendido por la quema de combustibles fósiles en los próximos veinte a cincuenta años se irá acumulando en la atmósfera.

Esto es una simple estimación basada en la experiencia anterior. Podría muy bien ser errónea —en cualquier sentido—, pero actualmente los científicos no tienen base para hacer un cálculo mejor. Si esperasen hasta que su conocimiento del ciclo del carbono fuese perfecto, tal vez sería demasiado tarde para que la sociedad hiciera planes respecto al cambio de condiciones; ya habrán variado para entonces. Los planificadores necesitan predicciones, y cualquier predicción es buena si no hay nada mejor. Sin embargo, no tiene sentido hacer creer que son mejores de lo que realmente son.

Las medidas de la concentración de dióxido de carbono en burbujas de aire aprisionadas en los hielos polares muestran que, durante la más reciente glaciación, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera pudo haber sido sólo la mitad de lo que es ahora; esto es debido probablemente a que los océanos fríos disuelven el dióxido de carbono con mayor eficacia. Cualesquiera que sean nuestras estimaciones acerca de la tendencia futura de la acumulación de dióxido de carbono, queda claro que estamos en camino de una situación única en los pasados 100.000 años de historia de la Tierra. Conociendo la pauta de las recientes glaciaciones y la forma en que se ha desarrollado el tiempo en el mundo durante los pasados millones de años, parece incluso probable que nos

estemos encaminando a una situación única en los pasados dos millones de años de historia de la Tierra. Predecir las consecuencias puede ser una cuestión de conjeturas, algunas más acertadas que otras. En primer lugar, hay que calcular cuánto combustible fósil se quemará en los próximos cincuenta años más o menos, y con qué rapidez (predicción ésta que ha desafiado el sentido común colectivo de más de un grupo de expertos), y en segundo lugar, predecir de qué manera la acumulación resultante de dióxido de carbono aumentará la temperatura global, mediante el efecto invernadero, y con ello alterará las características del clima alrededor del globo. Sería una tontería tomar las «predicciones» resultantes como una verdad absoluta acerca de lo que nos espera; pero aún sería más absurdo prescindir enteramente del problema en la esperanza de que se arregle por sí solo.

IX. EL DIÓXIDO DE CARBONO Y EL CLIMA: ¿TODO COMO SIEMPRE?

Tendremos una primera impresión acerca de la gravedad del problema del dióxido de carbono si suponemos que la actividad económica y el uso de energía en el mundo seguirán desarrollándose sin prestar atención a dicho problema. De este modo, será posible estimar el efecto de la acumulación resultante del dióxido de carbono sobre el clima. Ésta es la hipótesis de «todo como siempre»; pero, por desgracia, nadie puede hoy estar muy seguro de lo que significa exactamente «todo como siempre». A principios de los años setenta, e incluso después de la primera crisis del petróleo, había predicciones acerca de un crecimiento continuado de la demanda de energía a tasas del 4% por año, o incluso más, hasta comienzos del siglo XXI; en el otro extremo, hacia finales de la misma década, los pesimistas sostenían que se echaba sobre nosotros, quisiéramos o no. una era de crecimiento cero. La hipótesis «todo como siempre» no emite juicios sobre si el crecimiento es bueno o malo; simplemente trata de enjuiciar lo que sucederá si se deja que las tendencias naturales sigan su curso. Si el resultado probable parece indeseable, pueden tomarse medidas para garantizar que ese resultado nunca se produzca. Tales hipótesis no son pronósticos que anuncien lo que *sucederá*, sino imágenes de *posibles* mundos futuros, de entre los cuales tal vez pudiéramos escoger los más deseables.

Aparte de las incertidumbres económicas que hacen la predicción categórica del futuro uso de la energía virtualmente imposible en la actualidad, hay muchas cuestiones dudosas en los propios cálculos del efecto invernadero. El profesor Kondratyev, de quien hablamos en el capítulo 5, es uno de los climatólogos que hacen hincapié en que, además del dióxido de carbono, hay otros gases contaminantes que contribuyen al efecto invernadero. Entre ellos figuran los fluorocarbonos de

los pulverizadores —los cuales se han hecho célebres por el riesgo de que dañaran la capa de ozono—, los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre y el vapor de agua. De éstos, el vapor de agua puede ser de suma importancia, y se incluye en los mejores cálculos del efecto invernadero. En cuanto a los restantes, es imposible predecir cómo se acumularán en la atmósfera durante los próximos —digamos— 50 años, de modo que no puede calcularse, ni siquiera aproximadamente, su contribución al efecto invernadero. El dióxido de carbono es, en efecto, el principal componente del problema hoy día, pero, aun cuando se llegue a conocer por completo el efecto invernadero del dióxido de carbono, quedará todavía mucho trabajo por hacer Mientras tanto, nos tenemos que conformar con este primer aspecto del problema.

POSIBLES FUTUROS DE LA ENERGÍA

Existe tal cantidad de combustible fósil disponible, especialmente en forma de carbón, que no hay peligro de que éste se acabe en el mundo antes que la acumulación de dióxido de carbono llegue a ser importante. La «crisis de la energía», de la que oímos hablar tan a menudo, está relacionada con los crecientes *costos* de la energía, no con una escasez real de combustibles, y con la probabilidad de que las provisiones de crudos comiencen a escasear a finales de siglo. Los crudos son fuentes de energía muy convenientes, fáciles de transportar, y (hasta hace poco) baratos. El carbón es más sucio, más difícil de extraer del suelo y de transportar, y (hasta hace poco) más caro. Sin embargo, cuando se acabe el petróleo, si es que se acaba, podemos continuar con el carbón si es necesario (y si el efecto invernadero lo permite) durante cientos de años mientras se desarrollan nuevas fuentes de energía. La clave de la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera no es la cantidad de combustibles fósiles existentes en el suelo, sino la velocidad con que se extraen y se consumen.

Los geólogos estiman que el total de combustibles fósiles recuperables en el mundo, de los cuales el 90% es carbón,

equivalen a una cantidad de energía de 300.000 *quads*. Un quad es aproximadamente mil billones de julios; un quad por año viene a ser el equivalente a la energía producida por veinte centrales térmicas de 1.000 megavatios. Ésta es la energía consumida actualmente cada año por cada 10 millones de habitantes de Estados Unidos.

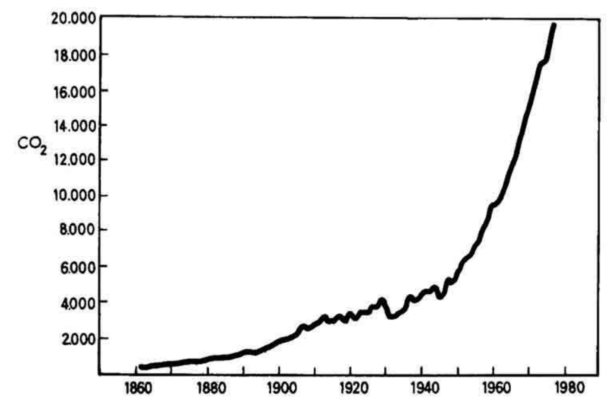


Fig. 9-1. Los cálculos de la cantidad de dióxido de carbono liberada a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles muestran que la acumulación está alcanzando proporciones descontroladas. Las cifras están en millones de toneladas y excluyen el dióxido de carbono de la tala de bosques. (Fuente: *Earthscan*.)

En el presente, la totalidad del planeta utiliza 250 quads por año, y, a este ritmo, las reservas recuperables de combustibles fósiles durarían otros 1.200 años Cualquier incremento en el uso de combustibles fósiles acorta esta escala de tiempo y asimismo lleva a una acumulación más rápida de dióxido de carbono en la atmósfera, dando a los océanos y a los otros sistemas que lo absorben menos tiempo para adaptarse y extraer el exceso de la atmósfera. A principios de los años setenta, el consumo global de combustibles fósiles aumentaba a un ritmo algo superior al 4% anual, lo cual era equivalente a duplicar la cantidad de combustible fósil usado cada16 años más o menos. Las reservas disponibles podían fácilmente satisfacer una demanda tan creciente durante unos 100 años más, pero después se agotarían. Desde 1974, con los costos de

la energía mucho más altos y una recesión económica global, el aumento en el consumo de combustibles fósiles ha sido del 2,5%. En números redondos, la tasa de incremento del 4% habría significado duplicar la concentración preindustrial del dióxido de carbono, hasta 600 ppm, para el año 2030; la reducción de la tasa de crecimiento al 2% sitúa la fecha de duplicación del dióxido de carbono en el año 2070. Ambas hipótesis suponen que la mitad del dióxido de carbono producido sería absorbido por sumideros naturales. Sin embargo, tan importantes como los valores globales son las probables variaciones del uso de combustibles en diferentes regiones del mundo durante la vida de la mayor parte de sus presentes habitantes.

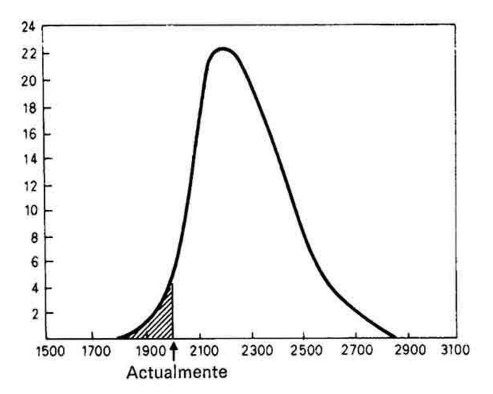


Fig. 9-2. Las estimaciones de las reservas totales de combustibles fósiles de la Tierra indican que hasta ahora hemos quemado (zona rayada) sólo una pequeña fracción de las reservas de carbón disponibles. Con un crecimiento sin límite, el consumo anual podría alcanzar en el año 2200 un máximo de cinco veces el actual, antes de descender a medida que las provisiones se agoten. Por suerte, ésta no es una hipótesis realista. (Fuente: *Earthscan*. La escala vertical está en gigatoneladas, o miles de millones de toneladas.)

LAS HIPÓTESIS «TODO COMO SIEMPRE»

Varios grupos de investigadores han considerado las consecuencias del uso continuado de energía en un mundo que actuase como si no pasara nada. La pauta de incremento de

principios de los años setenta indica muy probablemente un límite superior, el «peor caso posible» en términos de la acumulación de dióxido de carbono, dado que sería raro un retorno a tales condiciones; aun cuando la economía mejorase en un futuro muy próximo, el hecho de que la acumulación de dióxido de carbono sea ampliamente reconocida como un problema afectaría sin duda la planificación, al menos en algunas partes del mundo. Por ello consideramos una de las más detalladas hipótesis de «todo como siempre», publicada en 1978 por Ralph M. Rotty, del Instituto de Análisis de la Energía, Associated Universities Oak Ridge (Estados Unidos). Es típico de la clase de cálculos que hizo a la gente meditar y tener en cuenta el problema del dióxido de carbono.

Rotty dividió el mundo en seis sectores y estimó el posible crecimiento del uso de combustibles fósiles en cada sector —no en la totalidad del globo— hasta el año 2025. Comenzó sus cálculos tomando como base el año 1974 y supuso:

- Crecimiento energético cero en Estados Unidos, con consumo constante de 125 quads. 15% del combustible no fósil.
- Crecimiento del 2% por año en Europa occidental, con el 15% del combustible no fósil.
- Crecimiento del 4% por año en la Europa centralmente planificada, incluyendo la URSS, de nuevo con el 15% del combustible no fósil.
- Crecimientos similares a los de Europa occidental en Japón. Australia y Nueva Zelanda.
- Crecimiento del 4,5% en China y Asia centralmente planificada, casi todo en combustible fósil.
- Y un crecimiento anual de la *población* de 1,5% por año en el resto del «Tercer Mundo», acompañado de suficiente aumento en el uso de la energía para asegurar que en el año 2025 el consumo por cabeza habrá alcanzado el nivel global de 1970. Esto implica aproximadamente un crecimiento energético anual del 5% en esta región.

Las cifras mencionadas representan sólo hipótesis de partida, y cualquiera que las lea considerará algunas más plausi-

bles que otras. Otros científicos utilizan cifras un poco distintas y exponen hipótesis algo diferentes, pero todos acaban por obtener el mismo cuadro en líneas generales. En el caso de las cifras elegidas por Rotty, las hipótesis comportan una demanda global de 1.090 quads de combustibles fósiles en el año 2025, en comparación con los 250 quads de 1980. Esta es una cifra típica, próxima a las estimaciones hechas por otros investigadores que parten del mismo enfoque «todo como siempre». Y, de nuevo presentando un cuadro similar al desarrollado por otros investigadores, los cálculos de Rotty muestran el cambio de importancia relativa del mundo desarrollado actual (EE.UU., Europa y la URSS) al Tercer Mundo a lo largo de las próximas décadas. A principios del siglo XXI, en cualquier tipo de cuadro «todo como siempre», los mayores consumidores de combustibles y los mayores productores de dióxido de carbono serán, con mucha diferencia, los países hoy más pobres y menos desarrollados del mundo (fig. 9-3). Darse cuenta de esto es fundamental en cualquier debate del efecto invernadero debido al dióxido de carbono y del problema climático que puede plantear. Los pueblos que saben algo del problema y podrían estar motivados para tratar de resolverlo son, en general, los pueblos del mundo desarrollado. Sin embargo, los principales pro ductores de dióxido de carbono en el futuro próximo serán los países menos desarrollados, que muestran mayor preocupación por los beneficios inmediatos del crecimiento industrial que por cualquier amenaza a largo plazo contra el clima global. Esto convierte el problema del dióxido de carbono en una cuestión política, y, como veremos en el capítulo 11, las consecuencias políticas son tan complejas como los problemas científicos. La más simple de esas nuevas cuestiones ha sido recogida ya por la camarilla nuclear. Si la amenaza de la contaminación por el dióxido de carbono se considera tan real, y si los países menos desarrollados van a aumentar en gran manera su uso de carbón, puede haber una urgente necesidad de que Estados Unidos y Europa no sólo restrinjan su consumo de combustibles fósiles, sino que lo limiten radicalmente. El mundo real es mucho más complicado, pero tales argumentos son plan-

teados por parte de los partidarios de la energía nuclear para presionar a fin de lograr el paso a la energía nuclear como principal fuente y único camino practicable para limitar el uso de combustibles fósiles. De otra manera, como dice Rotty, «el problema de evitar cambios climáticos desencadenados por el CO_2 se convierte en el de proporcionar energía a los países en vías de desarrollo para asegurar su progreso sin esa pesada dependencia de los combustibles fósiles»: un problema político igualmente interesante.

Desde 1978, Rotty ha publicado varios cálculos revisados que toman en consideración las presentes y menores demandas globales de energía. Después de una reunión en Estocolmo para discutir el problema del dióxido de carbono a principios de 1981, el profesor Bert Bolin, de la Universidad de Estocolmo, me dijo que, en una reunión de la Organización Meteorológica Mundial a finales de 1980. Rotty había presentado unas hipótesis basadas en una acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera hasta 450 ppm en el año 2025. La hipótesis original de «todo como siempre» implicaba una producción de 23 Gt de carbono solamente en forma de dióxido de carbono en el año 2025, lo cual produciría un aumento de dióxido de carbono atmosférico de 11 ppm en el curso de un solo año, suponiendo que la mitad permanece en la atmósfera. Las cifras revisadas, más bajas, corresponden a un consumo de 12 a 15 Gt de carbono en ese año, todavía una entrada de 8 ppm de dióxido de carbono en la atmósfera.

Habida cuenta de todas las incertidumbres en la predicción del consumo de energía, estas cifras sirven perfectamente como guía. A menos que se hagan esfuerzos deliberados para evitar desprender dióxido de carbono en la atmósfera, la concentración preindustrial de 300 ppm se podría duplicar a 600 ppm para el año 2025, y muy probablemente aumentará en un 50%, hasta 450 ppm. La pregunta que los climatólogos han de contestar es qué efecto producirá tan considerable cambio sobre el tiempo en el mundo.

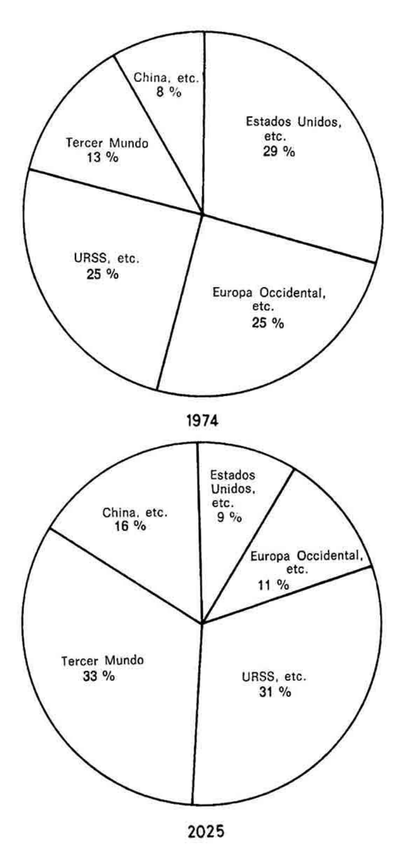


Fig. 9-3. Producción global de CO_2. La hipótesis energética de «todo como siempre» supone un crecimiento cero de energía en Estados Unidos entre el momento presente y el año 2025, 2% de crecimiento en Europa Occidental, 4% en la URSS y Europa oriental, 4,5% en China y 1,5% en el Tercer Mundo. Sobre esta base, y haciendo hipótesis probables acerca del uso de combustibles fósiles en cada región, las emisiones de CO_2 para el año 2025 serán seis veces las de 1974. Sin embargo, el Tercer Mundo y China, que probablemente dependerán mucho del carbón, contribuirán a la producción de CO_2 en el mundo en proporción mucho más alta que hoy día.
Nota: EE.UU., etc. incluye Canadá; Europa occidental, etc. incluye Japón, Australia y Nueva Zelanda; URSS, etc. incluye Europa oriental; China, etc. incluye Corea del Norte y Vietnam.

(Fuente: Ralph M. Rotty en *Carbon Dioxide, Climate and Society* [El dióxido de carbono, el clima y la sociedad], ed. Jill Williams.

EL CLIMA EN UN COMPUTADOR

Los primeros programas climáticos de computador que fueron capaces de hacer predicciones sensatas de los efectos sobre el tiempo mundial de un aumento en la concentración de dióxido de carbono fueron desarrollados entre principios y mediados de la década de 1970. Para mucha gente, el 4% de crecimiento anual en la hipótesis de «todo como siempre» parecía una buena aproximación al mundo real, y algunas personas todavía hablaban de crecimiento económico, y de la correspondiente demanda de energía, desarrollados con la suficiente rapidez como para duplicar la concentración de dióxido de carbono atmosférico incluso antes de finales del presente siglo. En tal estado de opinión, aquellos primeros modelos informáticos de los efectos probables de la acumulación sobre el clima debieron de caer como una bomba científica.

A causa de los cambios naturales del clima, las pequeñas variaciones de lluvia, temperatura y demás, son difíciles de identificar e interpretar. Si tenemos un verano cálido —como el de Estados Unidos y Canadá en 1980— eso no significa necesariamente que el mundo se esté volviendo más cálido por el efecto invernadero ni por ningún otro efecto, sino que lo más probable es que sea una de esas cosas que ocurren por casualidad. Al mismo tiempo, incluso los programas de computador desarrollados por los climatólogos no son demasiado buenos para trabajo detallado, ya que su objetivo es proporcionar una guía acerca de los grandes rasgos, o, podríamos decir, «de brocha gorda». La combinación de esos dos efectos significa que, durante los años setenta, y en gran parte incluso hoy día, los climatólogos han sido sumamente cautelosos en cuanto a la interpretación de las predicciones de computador del efecto sobre el clima de cualquier cosa menor que la duplicación de la concentración preindustrial de dióxido de carbono. Digamos que los modelos informáticos no nos dicen nada acerca de los efectos de incrementos menores, aunque pocas personas podrán resistir la tentación de hacer la razonable «predicción» de que un incremento menor (p. ej.,

de un 50%) producirá un cambio proporcionalmente menor (en este caso, la mitad), pero en el mismo sentido. Esto entra en el terreno de la especulación, y puede no ser tan razonable si resulta que algunos cambios sólo se producen cuando se alcanza un nivel determinado de dióxido de carbono. Los modelos informáticos constituyen una buena guía sobre lo que sucederá cuando se haya duplicado la concentración de dióxido de carbono —aunque algunos expertos lo dudan— y pueden, por tanto, indicar la dirección en la que se mueve ahora la máquina atmosférica: pero nada dicen acerca del camino que la máquina atmosférica seguirá hasta el próximo hito en su ruta.

Hasta mediados de los años setenta, los modelos desarrollados por diferentes grupos, con sus predicciones para un mundo con una atmósfera dos veces más rica en dióxido de carbono que la actual, no concordaban entre sí. Esos primeros modelos dieron lugar a diversas estimaciones de los efectos de tal duplicación del dióxido de carbono sobre la temperatura, y nada podían decir acerca de cómo cambiaría la distribución de la lluvia en un mundo más caliente. La situación empezó a mejorar en 1975, a medida que los propios modelos mejoraron.

Los programas más simples usaban un promedio global en el cual la energía procedente del Sol se compensaba con el calor radiado por la Tierra, teniendo en cuenta la absorción de radiación infrarroja por el dióxido de carbono, pero utilizando sólo un valor para la temperatura media del globo en cada fase del cálculo. Más tarde se pasó a considerar las diferencias de temperatura en distintas latitudes, empleando temperaturas medias para zonas de distinta latitud. Algunos de esos modelos «bidimensionales» intentaron tener en cuenta la realimentación debida a la nubosidad, el transporte de calor desde los trópicos a los polos, etc. Sin embargo, los modelos que ahora suelen considerarse mejores para los estudios climáticos son los modelos «tridimensionales» de circulación general, o MCG. Estos modelos comienzan con un conjunto de condiciones iniciales (calor solar, cobertura nubosa, distribución zonal de temperatura según la latitud y, en los mejores

programas, con la altura, la concentración de dióxido de carbono. etc.). Luego se les hace «correr», sometiéndolos a cálculos repetidos de las respuestas de la atmósfera a esas condiciones y de las respuestas de las variables a los cambios atmosféricos, hasta que llegan a un régimen estacionario en que todas las variables se mantienen constantes. Tales valores de las variables clave se toman como guía sobre la forma en que responde la atmósfera real a semejantes condiciones iniciales.

Incluso la MCG tridimensionales están lejos de ser representaciones adecuadas de la realidad. En la mayor parte de los cálculos con MCG sólo se considera un hemisferio del globo, y la radiación solar se ha de introducir como valor fijo, correspondiente bien a verano o bien a invierno. Los MCG no pueden calcular los efectos de las variaciones estacionales. Como unos programas tan complicados han de ser desarrollados en el computador durante un tiempo prolongado hasta que dan resultados, y es necesario repetirlos muchas veces para proveer una base estadística con que interpretar sus «predicciones», son sumamente caros en términos de investigación científica, y sólo se han desarrollado unos pocos de ellos por parte de equipos que tienen acceso a los mayores y más rápidos computadores.

Quizás el defecto más notable es que ninguno de los MCG desarrollados hasta ahora trata de modo adecuado los océanos. Las temperaturas en la superficie del mar son determinadas en los programas, pero en general no cambian en realimentación con las otras variables, y el papel de las corrientes oceánicas en el transporte de calor alrededor del mundo no se tiene en cuenta. Esto constituye una aproximación muy poco fiel a la realidad para un planeta en el que el 70% de la superficie es agua. Un equipo del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos) en Princeton (Estados Unidos) ha intentado incluir los efectos oceánicos mediante un programa en el que el mar se representa por una artesa no circulante sin capacidad para absorber calor y con una provisión infinita de agua: ésta es una aproximación menos infiel. Los «mejores» modelos, según el

profesor Bolin, empiezan a emplear ahora números correspondientes a un océano en el que la capa superficial está mezclada hasta una profundidad de 100 a 200 m. Pero esto, dice, es «todavía inadecuado».

Los MCG son las mejores herramientas disponibles para estudiar regímenes climáticos, pero sus resultados más fiables se obtienen atendiendo a los grandes rasgos: por ejemplo, las diferencias entre la circulación atmosférica actual y la que correspondería a la plenitud de una glaciación. Cuando se utilizan en el contexto del efecto invernadero, funcionan en el límite de sus posibilidades útiles. Los climatólogos reconocen que los modelos son imperfectos y que sus «predicciones» no deben tomarse como la última palabra: pero toda la ciencia trata de probabilidades, y un gran número de climatólogos están hoy convencidos de que la probabilidad de que los MCG den resultados correctos a grandes rasgos es demasiado alta para que los gobiernos y otros organismos encargados de los planes a largo plazo los ignoren.

EL CONSENSO DE 2°C

El acuerdo entre los diferentes grupos de climatólogos empezó a establecerse en 1975. En lo que ahora se considera un artículo clave en el debate acerca de los efectos que el aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico tiene sobre el clima. Stephen Schneider, del National Center for Atmospheric Research de Estados Unidos, en Boulder (Colorado), intentó aclarar la aparente confusión causada por el amplio margen de estimaciones que habían sido publicadas por diferentes grupos Las cifras, en relación con una duplicación de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, oscilaban entre una baja estimación de un aumento de temperatura de 0,7°C hasta la estimación más alta de 9,6°C. Schneider examinó las diversas hipótesis de los climatólogos, desarrolladas a partir de diferentes programas, y las relacionó con las condiciones físicas del mundo real. Halló explicaciones para la mayor parte de las predicciones publi-

cadas, y concluyó que la mejor estimación del aumento de temperatura correspondiente a una duplicación de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera era un aumento de entre 1,5°C y 2,4°C.

Durante el mismo año. Syukuro Manabe y Richard Wetherald, de la Universidad de Princeton, publicaron lo que era entonces una de las más completas simulaciones de MCG, usando el programa del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos con su artesa oceánica. Su cifra para el aumento de temperatura debido a una duplicación del dióxido de carbono resultó también próxima a 2°C, justo en medio de las cifras establecidas por la interpretación de Schneider de los programas disponibles. La combinación del trabajo de Schneider y de los cálculos del MCG del grupo de Princeton probablemente habría bastado para establecer la regla de que una duplicación del dióxido de carbono corresponde aproximadamente a una subida de 2°C en la temperatura media global, regla que mereció el respeto de muchos climatólogos. Sin embargo, un tercer trabajo científico, publicado también en 1975, llevó esta cifra —realmente sólo aún una regla aproximada— a la atención de una audiencia mucho más amplia, y contribuyó a desencadenar el debate más extenso que ha continuado hasta el día presente.

Wallace Broecker, del Lamont-Doherty Geological Observatory, fue uno de los primeros científicos que examinó en detalle las consecuencias de un calentamiento global inducido por el dióxido de carbono. Como base para sus pronósticos, utilizó un valor de 2,4°C para el calentamiento global debido a la duplicación del dióxido de carbono, cifra que provenía de unos cálculos más antiguos efectuados por Manabe y Wetherald en 1967, pero que resultó estar próxima a la cifra sobre la que había acuerdo. O bien Broecker tuvo suerte, o bien fue un astuto juez de la garantía que ofrecían los diferentes programas. En efecto, escogió una buena revista para publicar su discusión del, según parece, inminente calentamiento global; se trata de *Science*, probablemente la revista científica más leída del mundo, de la cual los medios de comunicación populares extraen emocionantes relatos científicos. Mediante

una combinación de los ciclos naturales de temperatura hallados en el análisis de muestras de hielo de Groenlandia, algunas sencillas hipótesis del tipo «todo como siempre» acerca del crecimiento del dióxido de carbono atmosférico, y una estimación de que cada 10% de aumento de la concentración de dióxido de carbono produce un aumento de temperatura del 0,3°C. Broecker causó cierta sensación al predecir que «el crecimiento exponencial del contenido atmosférico del dióxido de carbono tenderá a convertirse en un factor importante, y a principios del próximo siglo habrá llevado la temperatura media planetaria más allá de los límites experimentados en los últimos 1.000 años[13]». Dado que los ciclos de las muestras de hielo sugieren que una tendencia natural al enfriamiento está a punto de invertirse, justo en el momento en que el efecto de invernadero antropogénico puede empezar a tener importancia. Broecker sugirió que «el comienzo de la era de calentamiento inducido por el CO_2 tal vez sea mucho más marcado que en ausencia de variaciones climáticas naturales... podemos estar a punto de sufrir una sorpresa climática».

Un detalle que Broecker mencionó sólo de pasada, como si se le ocurriera entonces, puede haber sido, como veremos, uno de los puntos más importantes de su artículo. «Manabe y Wetherald han sugerido», indicaba, «que el efecto en las regiones polares es mucho mayor». Los modelos informáticos de finales de los setenta y otros estudios han demostrado que esto es así realmente. Un calentamiento global *medio* de un grado o dos puede implicar un aumento de temperatura varias veces mayor a altas latitudes, pero sólo un pequeño aumento en los trópicos. Las razones de ello guardan relación con un transporte más eficaz de aire tropical caliente hacia el polo en

[13] La cifra del aumento de temperatura de 0,3°C por cada 10% de aumento de la concentración del CO_2 proviene de la estimación de que la temperatura aumenta en proporción al logaritmo de la concentración del CO_2 atmosférico. La base de esto depende de la hipótesis sobre la manera exacta de absorber radiación infrarroja cuando la concentración de CO_2 aumenta; puede no ser enteramente correcta, pero ayudó a Broecker a hacer detalladas y espectaculares predicciones que captaron la atención del público interesado en cuestiones científicas.

un mundo más caliente, y con la forma en que la nieve y el hielo reflejan el calor solar incidente. Cualquier pequeño aumento de temperatura que reduzca la extensión de los campos de nieve y las capas de hielo supone que hay una mayor proporción de suelo oscuro u océano para absorber energía solar, asegurando un ulterior aumento de temperatura en la superficie. En los trópicos, todo el calor que puede absorberse está ya siendo absorbido, de modo que este efecto de realimentación no tiene allí probabilidad de iniciarse.

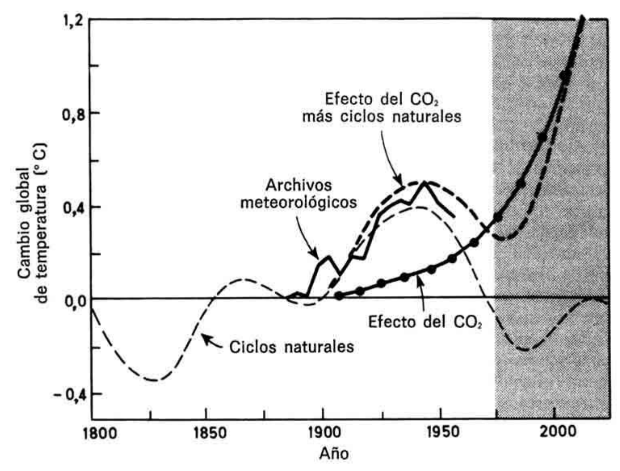


Fig. 9-4. La combinación efectuada por Wallace Broecker de los cambios globales de temperatura causados por ciclos naturales, el efecto invernadero del dióxido de carbono predicho y un pronóstico basado en el estudio de ambos. Ésta fue la primera predicción científica de tiempos recientes que llamó la atención sobre la posibilidad de un rápido calentamiento global en el próximo futuro. (Fuente: *Science,* Vol. 189, pág. 461,1975.)

Las consecuencias, a efectos regionales, de un aumento incluso modesto en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera son de suma importancia. Nuevos cálculos y otras formas de investigar las pautas regionales de cambios climáticos asociados a un calentamiento global proporcionaron, a principios de los ochenta, una perspectiva muy diferente sobre la naturaleza del problema del dióxido de carbono.

En resumidas cuentas, las regiones que serán afectadas de manera más notable y con mayor rapidez por el efecto invernadero antropogénico serán las regiones a altas latitudes: el rico Norte. Sin embargo, como ya hemos mencionado, las regiones que contribuirán más a causar la acumulación de dióxido de carbono en el futuro inmediato son aquellas situadas a bajas latitudes. Tanto si el rico Norte se preocupa o no del problema del efecto invernadero por dióxido de carbono, ¿le va a importar nada al pobre Sur, que puede quedar en gran parte intacto y que podría incluso beneficiarse de los cambios climáticos que se esperan?

La mayor parte del resto del libro trata de las consecuencias de este aspecto nuevo y poco difundido del problema del dióxido de carbono. No obstante, antes de examinar las consecuencias regionales del calentamiento global —en lo que se refiere a lluvia, temperatura y agricultura— hay que señalar que existe una minoría para la cual el consenso acerca de los 2°C está equivocado. De hecho, el consenso proviene de sólo unos pocos grupos —literalmente, tres o cuatro equipos— que trabajan con los grandes modelos MCG. ¿Es posible que todos ellos estén cometiendo el mismo error en algún punto de sus cálculos?

UNA VOZ EN DISCORDIA

Sherwood Idso, del *Water Conservation Laboratory* (Laboratorio de Conservación de Aguas) de Estados Unidos en Phoenix. Arizona, publicó a principios de 1980 un corto trabajo en *Science,* en el que sugería que todos los modelistas del clima estaban, en efecto, cometiendo el mismo error y que el consenso de 2°C era aproximadamente diez veces demasiado grande. Según Idso, la duplicación de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera no causaría un calentamiento global mayor de un cuarto de grado centígrado. Los climatólogos quedaron asombrados por esta idea, y en especial porque el breve trabajo de Idso en *Science* no daba detalles sobre el método que había utilizado para llegar a esta

conclusión, remitiendo al lector interesado a un trabajo más amplio «en preparación». Este es un método normal cuando se trata de novedades científicas candentes, no tanto para que el investigador pueda tener dos oportunidades de publicidad, sino para asegurar que las conclusiones importantes lleguen en seguida a una amplia audiencia, mientras que los complicados, y —seamos francos— a veces aburridos detalles, se reservan para revistas influyentes pero de lenta publicación. Ello significa que transcurre cierto tiempo antes que los detalles estén al alcance de todos, si bien quienes estén interesados pueden obtenerlos directamente del investigador en cuestión, en este caso Idso: e Idso se preocupó de que todo el material fundamental de base hubiera sido examinado por *Science* antes de que aceptaran su corto artículo. Por suerte, pudo presentar su argumentación en detalle en una reunión de trabajo sobre la «seria interpretación de los modelos atmosféricos y datos relacionados con ellos», que tuvo lugar en la Scripps Institution of Oceanography en marzo de 1981. Los modelistas del clima no quedaron convencidos por los argumentos de Idso, pero al menos éstos se hallan registrados en las actas de dicha reunión (por el American Institute of Physics) para quien le interese el tema. Los argumentos son especialmente interesantes porque Idso ha empleado un enfoque conceptual del problema del dióxido de carbono completamente diferente. En lugar de simular la máquina atmosférica en un computador y calcular cómo responderá ésta a una acumulación de dióxido de carbono, él ha examinado la forma en que varía la temperatura en la superficie de la Tierra en el mundo real cuando cambian las condiciones atmosféricas, y ha intentado, a partir de esas observaciones —medidas directas de temperatura y energía radiante— calcular una «función de respuesta» que nos dirá cómo responderá la temperatura al efecto invernadero del dióxido de carbono. Durante sus estudios del equilibrio entre la radiación solar incidente y la radiación infrarroja emitida por el suelo en Arizona. Idso ha controlado las variaciones producidas por el polvo en la atmósfera, las variaciones en la cantidad de vapor de agua (humedad) y las variaciones de nubosidad. Las tempestades de

polvo, por ejemplo, ejercen muy poca influencia sobre las temperaturas en el suelo a las horas de luz, porque el calor del Sol que no llega es compensado por el calor que la atmósfera polvorienta radia hacia el suelo. Todavía más interesante, hay una época a finales de junio o principios de julio cada año en la que la cantidad de vapor de agua en Arizona varía de forma espectacular, duplicándose o triplicándose casi de un día a otro. Este monzón de Arizona es consecuencia de vientos a alto nivel procedentes del golfo de México y bruscos aumentos de humedad a bajo nivel que vienen del golfo de California. Mediante datos que cubren los pasados treinta años. Idso halló que un aumento del contenido de humedad en la atmósfera suficiente para elevar la presión del vapor de agua desde 4 a 20 hectopascal, corresponde a un aumento de la temperatura del aire en la superficie de 11,4°C al amanecer. Este gran aumento de la temperatura mínima del ciclo diario —tal vez justo antes del amanecer no sea la hora más oscura del día, pero ciertamente es la más fría, al menos en el desierto— muestra de la manera más notable el efecto protector del vapor de agua. Las temperaturas máximas diarias y las medias revelan sólo un efecto mucho menor, por la misma razón que una manta de polvo tiene poco efecto sobre las temperaturas diurnas: el calor interceptado del Sol en el camino casi se equilibra con el calor emitido por el suelo que no puede escapar. A partir de los estudios conjuntos del polvo y del «monzón», Idso calculó que por cada vatio extra de energía radiante que pase a través de una capa de aire junto al suelo y de un metro cuadrado de área, la temperatura del aire en la superficie responde con un aumento de 0,196°C.

Estos dos cálculos, sin embargo, dependen de variaciones en la atmósfera durante algunos días. Para compararlas con variaciones estacionales. Idso utilizó una compilación de medidas de radiación solar de 105 estaciones de observación repartidas por Estados Unidos y las cotejó con las fluctuaciones estacionales de temperatura en los puntos de observación. Averiguó que los lugares interiores mostraban exactamente la misma función impulsora (0,19°C por vatio por metro cuadrado), pero que para lugares al borde del mar la respuesta se

reducía a la mitad. Admitiendo que esto representa la máxima respuesta posible del océano, y teniendo en cuenta el hecho de que el 70% de nuestro planeta está cubierto por mar. Idso estimó que la función media global de respuesta no debe de ser más de 0,113°C por vatio por metro cuadrado.

¿Qué nos dice esto respecto al efecto invernadero? Es relativamente fácil calcular el aumento en la cantidad de energía radiante en el suelo que se produciría si la cantidad de dióxido de carbono aumentase desde 300 ppm hasta 600 ppm. Vale 2,28 vatios por metro cuadrado; multiplicándolo por el factor impulsor 0,113 da un aumento equivalente de la temperatura media global de 0,25°C, en marcada discrepancia con los modelos informa ticos.

Cálculos similares realizados por Reginald Newell, del MIT, y Thomas Dopplick, de la Base Scott de la Fuerza Aérea, proporcionaron una cifra similar para la función impulsora, lo que Idso considera como una confirmación de la validez de su técnica. Los críticos, entre ellos Stephen Schneider. Will Kellogg y V. Ramanathan, del National Center for Atmospheric Research de Estados Unidos, no estuvieron de acuerdo, y lo comunicaron así en una carta a *Science.* Su principal argumentación era que los enfoques de Newell y Dopplick, así como el de Idso, ignoraban un mecanismo esencial de realimentación. En el mundo real, el calor extra causa la evaporación de una mayor cantidad de agua de los océanos, lo que aumenta el contenido de vapor de agua en la atmósfera, y dado que el vapor es un buen gas invernadero hace aumentar la temperatura aún más. «No estamos convencidos de que los resultados de Idso deban modificar nuestro punto de vista acerca del problema del dióxido de carbono», sostenía el grupo del NCAR. En su exposición en Scripps, Idso trató de responder a esa importante crítica. Para una temperatura de aire de 15°C dice, el aumento de la presión del vapor de agua producido por un calentamiento de 0,25°C es de 0,2 hectopascal. Esto, a su vez, produce un efecto invernadero adicional suficiente para incrementar la temperatura en sólo 0,07°C más, y este nuevo aumento de temperatura, al enviar más vapor al aire, causa un aumento ulterior de sólo

0,01°C en las temperaturas medias globales. Hemos alcanzado rápidamente el punto en que los efectos de realimentación se hacen cada vez menores, e, incluso teniendo en cuenta este efecto extra, el cálculo da todavía sólo 0,3°C de aumento para una concentración doble de dióxido de carbono.

El presente autor, que también es físico, siente gran simpatía por el enfoque de Idso al problema del dióxido de carbono mediante medidas reales de radiación y variaciones de temperatura en el mundo real como base para sus cálculos, en lugar de números abstractos encerrados en las entrañas de un computador; pero, incluso como físico, el autor encuentra los detalles de las medidas de equilibrio radiactivo demasiado especializados para serle familiares. Y pese a ello, incluso las medidas estacionales se refieren sólo a ritmos anuales, mientras que el problema de la acumulación de dióxido de carbono tiene una escala de tiempo de décadas y siglos. James Hansen y sus colegas del Goddard Space Flight Center de la NASA han suscitado precisamente este punto, arguyendo, en un trabajo publicado en *Science* en agosto de 1981, que hacen falta años para que el océano responda a una variación a largo plazo en el equilibrio energético del globo. Sus modelos informáticos, cuando se les hizo calcular una función de respuesta como la calculada por Idso, dieron un valor de 0,2°C por vatio por metro cuadrado en el interior, la mitad de ese valor en la costa, y sólo una décima parte del mismo en los océanos, en general en concordancia con las medidas de Idso del mundo real. Sin embargo, el resultado inmediato de una duplicación instantánea de la concentración de dióxido de carbono en los modelos informáticos es que la mayor parte de la energía se invierte en calentar los océanos. El aumento de temperatura en la superficie que se produce *con el tiempo* (en este modelo particular. 2,8°C) sólo tiene lugar una vez que los océanos, los máximos depósitos de calor y fuentes de «inercia térmica», se han adaptado al nuevo equilibrio entre la radiación incidente y la emergente. El consenso de los 2°C se aplica únicamente cuando se ha establecido un nuevo equilibrio. Mientras la concentración de dióxido de carbono está cambiando no se puede, por supuesto, establecer equilibrio al-

guno, y, por lo menos, el trabajo de Idso pone de relieve lo poco o nada que los modelos informáticos nos dicen acerca de cómo pasará el mundo de su presente estado climático al pronosticado para un mundo con una concentración doble de dióxido de carbono atmosférico.

Idso hace mención de algo todavía más impresionante. Olvidemos los detalles, dice, y consideremos la Tierra como un todo. La experiencia de Manabe y Wetherald en modelismo informático se utilizó, ya en 1967, para calcular la temperatura de equilibrio de un mundo igual que la Tierra, pero sin atmósfera. Este mundo, bastante improbable, tendría todavía océanos, vegetación, montañas, desiertos, etc., pero no manta protectora de aire a su alrededor y, por supuesto, no experimentaría efecto invernadero alguno. Su temperatura, según Manabe y Wetherald, sería de –23°C (o. como dice Idso, la «temperatura global del aire» de un mundo sin aire sería de –23°C). Una mejora reciente de este cálculo sugiere que una temperatura más adecuada sería de –19°C, y, como la presente temperatura media global del aire es aproximadamente de 15°C, se puede concluir que el efecto invernadero global de la atmósfera aumenta la temperatura en unos 34°C.

Esto incluye todos los procesos de realimentación en los que intervienen los océanos, el vapor de agua, las nubes, el polvo y cualquier otra cosa que se nos pueda ocurrir, y representa un equilibrio que se ha alcanzado tras miles de millones de años. La «perturbación» responsable es la absorción de parte de la radiación emergente desde la superficie de la Tierra en la atmósfera, y la totalidad del flujo radiante que escapa vale 348 vatios por metro cuadrado. Así pues, la función de respuesta apropiada para la totalidad de la Tierra a lo largo de escalas geológicas de tiempo es de 0,1°C por vatio por metro cuadrado, simplemente dividiendo los 34°C del efecto invernadero por el flujo de energía medido. De nuevo, el valor se acerca al hallado en estudios locales. Sin embargo, los modelos informáticos, que muestran un efecto invernadero mucho mayor que el calculado por Idso, incluyen también en su interior este valor de función de respuesta. El próximo paso de Idso es investigar una propiedad de la atmósfera denomi-

nada emisividad, que es una medida de lo próximas que están sus propiedades como absorbente y radiador de energía a las del más eficaz radiador posible, el llamado cuerpo negro. Un cuerpo negro, en este sentido, es en realidad una abstracción, una visión idealizada de la realidad por parte de los físicos: pero muchos objetos —el Sol, por ejemplo— se comportan casi igual que cuerpos negros en varios aspectos. Un cuerpo negro perfecto absorbe toda la energía radiante que recibe, y en cuanto a la energía emitida por la superficie de la Tierra (no. por supuesto, para la radiación solar incidente a longitudes de onda mucho más cortas), la atmósfera de la Tierra tiene aproximadamente un 90% de la eficacia de un cuerpo negro en lo que se refiere a absorción de energía En cualquier caso, la atmósfera nunca podría ser más eficaz que un cuerpo negro, y, al actuar ahora como un 90% de un cuerpo negro en el infrarrojo, ha producido un efecto invernadero global de menos de 40°C. Ese 10% que falta, dice Idso, no podría producir más de otro 10% de efecto invernadero, es decir, no más de un ulterior aumento de temperatura media global de 4°C.

Esta conclusión, algo sorprendente —para quien esté familiarizado con las predicciones de los MCG— se aplica al efecto invernadero del dióxido de carbono y a cualquier otro cambio normal en la atmósfera; pero, por supuesto, no a un cambio brutal como sería un aumento de la densidad atmosférica que pudiera compararse a la de Venus. Sea cual sea la acción del dióxido de carbono, no puede hacer a la atmósfera más eficaz en cuanto al calentamiento debido al efecto invernadero que lo sería un cuerpo negro, y, según los cálculos de Idso, esto fija un límite superior para la temperatura de la Tierra hoy día de sólo 4°C por encima del actual valor medio global. Las pruebas geológicas apoyan la argumentación de Idso. Durante al menos millones de años, y probablemente durante mucho más, la Tierra no ha tenido nunca una temperatura media superior en dos grados a la de hoy, aun cuando la cantidad de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera hayan variado de forma considerable. El mundo real parece, basándose en ello, menos sensible a las variaciones de temperatura que lo que los MCG quieren hacernos creer, e

incluso Wallace Broecker, la primera persona que dio la voz de alarma acerca de la acumulación de dióxido de carbono, apoya inconscientemente el punto de vista de Idso. En la conferencia del programa de investigación sobre el dióxido de carbono y el clima, celebrada en abril de 1980, en Washington. D.C., a Broecker se le preguntó si se podría hallar las características de un mundo más caliente reconstruyendo, a partir de pruebas geológicas, el clima de alguna época reciente en la que el mundo fuera 2,5°C más cálido que en el presente. Aquél respondió: «puede que nunca haya habido una época en la que el mundo fuera tan cálido, al menos en los últimos millones de años»: y otro participante en el debate añadió que «los climas del pasado difieren del de hoy más en lo que respecta a las distribuciones espaciales de temperatura y circulación atmosférica que en la temperatura media global».

Para un físico cuya reputación profesional no esté en juego, cualquiera que sea el resultado final del debate, este último ejemplo de Idso merece respeto y sugiere que, al menos, no deberíamos dejarnos deslumbrar por el consenso de los MCG. A decir verdad, los modelistas informáticos del clima nunca dijeron que debíamos hacerlo, y siempre han señalado las incertidumbres en su trabajo. Estas incertidumbres, no obstante, han quedado mucho más claras después de la intervención de Idso. Newell y Dopplick. Para octubre de 1981, otros investigadores habían empezado a examinar de nuevo la totalidad del problema del efecto invernadero, y Robert Kandel de la Université Pierre et Marie Curie de París, había hecho el mismo tipo de comparación entre el nuevo enfoque y los últimos cálculos de MCG que Schneider hizo para los diversos modelos informáticos ya en 1975. En un artículo publicado en *Nature*, Kandel señaló que el aparente desacuerdo entre los dos enfoques del problema era el resultado de una diferencia real, la forma de considerar la evaporación de los océanos. Esta es una cuestión clave por dos razones: porque se requiere una gran cantidad de energía calorífica para evaporar el agua, y porque el vapor de agua extra aporta su propia contribución al efecto invernadero: según Kandel, sin

embargo, esta cuestión rara vez se ha tratado de modo satisfactorio. El valor exacto de la predicción del aumento de temperatura para una duplicación del dióxido de carbono en la atmósfera se basa, en todos los cálculos, en la diferencia entre dos números relativamente grandes que son casi iguales y que describen la aportación y el gasto del equilibrio de energía en la superficie. Uno de esos grandes números depende en sí mismo de las hipótesis planteadas acerca de la variación de humedad en el aire justo encima de la superficie del mar, de modo que un pequeño cambio en la variable humedad conduce a un gran cambio en el aumento de temperatura pronosticado. Haciendo un llamamiento a los modelistas informáticos del clima para que publiquen más información sobre las hipótesis relacionadas con la humedad inherente a sus modelos, de forma que los demás tengamos mayor oportunidad de valorar sus predicciones. Kandel sostiene que «por lo que podemos decir hoy, dependiendo de la respuesta del ciclo hidrológico y de la humedad atmosférica a una duplicación de CO_2, el aumento de la temperatura en la superficie podría ser tan bajo como 0,5°K o tan alto como 10°K. Aquí, los grados K son exactamente equivalentes a los grados centígrados, y da la impresión de que volvemos a caer en la confusión de 1974, antes que emergiera el consenso original de los modelistas informáticos del clima. En vista del cálculo de Idso de la contribución total de la atmósfera al efecto invernadero en la actualidad, y de la sugerencia de que el máximo aumento ulterior posible de la temperatura en la Tierra debido a tal efecto no puede superar 4°C, parece muy probable que la mitad del intervalo que menciona Kandel, entre 0,5°C y 5°C, se pueda tomar con seguridad como comprendiendo el posible aumento de temperatura global si la concentración de dióxido de carbono se duplica. Esto deja todavía más incertidumbre de la que la mayor parte de las predicciones suponen, junto con una ligera sospecha de que, después de todo, puede no haber un problema importante. El caso no está resuelto todavía, y, aunque con el tiempo resulte que la voz en discordia de Idso nos dice más acerca del mundo real que los MCG en este punto, la mención de la distribución espacial debe evitar cual-

quier sentimiento de tranquilidad. Las distribuciones espaciales describen la variación regional del viento, la lluvia y la temperatura. Si las altas latitudes resultan mucho más afectadas que los trópicos, un calentamiento de 1°C (que podría satisfacer tanto los cálculos de Idso como los de los MCG), sería capaz de producir una variación de varios grados en regiones clave del globo. Y si una tendencia al calentamiento aporta cambios en otros factores climáticos, podría ocurrir que las nuevas pautas de sequía e inundaciones resulten importantes para la agricultura incluso antes que el globo se haya calentado un solo grado. La preocupación acerca de los cambios regionales de clima en un mundo más caliente, que comenzó a tomar cuerpo en los primeros dos años de la década de 1980, difícilmente queda afectada incluso si Idso está en lo cierto. Además, existen ya algunas pruebas de que, si bien el calentamiento que se espera no se está produciendo con tanta rapidez como los MCG han predicho, puede ya ser mensurable y a un nivel más alto del que los cálculos de Idso implicarían. La verdad puede hallarse entre ambas opciones, y hay todavía serios motivos de preocupación.

X. EL DIOXIDO DE CARBONO Y EL HOMBRE: ADAPTACIÓN AL CAMBIO

En su excelente libro *Thinking Physics,* Lewis Epstein y Paul Hewitt (profesores de Física en el City College de San Francisco) avisan a sus lectores: «No se fíen de las palabras ni de las ecuaciones hasta que hayan podido imaginarse la idea que representan». Este aforismo debería estar grabado en el corazón de todos los físicos. Si uno se fija sólo en las gráficas y las ecuaciones, y ve una acumulación creciente del dióxido de carbono en la atmósfera junto con cifras que muestran que el dióxido de carbono aprisiona la radiación infrarroja, se podría fácilmente asustar imaginando que el mundo está en camino de un efecto invernadero incontrolado, condenado a freírse como el planeta Venus. Sin embargo, existe un límite para la radiación que puede ser absorbida. La Tierra sólo emite tanta energía radiante en el infrarrojo, y cualquiera que sea el aumento de la concentración de dióxido de carbono, tiene que haber un límite para el aumento de temperatura.

Para cierta concentración del dióxido de carbono en la atmósfera, toda la radiación emitida por la superficie de la Tierra en la banda entre 12 y 18 micras será absorbida. Una vez se haya llegado a este estado, la adición de una mayor cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera no podrá calentar más el planeta, porque ya no habrá más radiación emitida de la longitud de onda adecuada. Añadir toda la atmósfera de la Tierra a un planeta sin ella ha producido un aumento de temperatura de sólo 34°C: a pesar de ello, las medidas muestran que, en las bandas del infrarrojo cruciales la atmósfera está absorbiendo ya casi el 90% de la radiación emergente. Así, según el argumento de Idso, saturar la banda del infrarrojo completamente ya no puede producir un ulterior aumento de la temperatura media global superior a 4°C.

¿Con qué rapidez subirá la temperatura cualquiera que sea su límite? La banda de absorción del dióxido de carbono en el infrarrojo se superpone a la del vapor de agua, y ya hay una gran cantidad de vapor de agua en la atmósfera. La radiación infrarroja ya absorbida por el vapor de agua no puede ser absorbida de nuevo por el dióxido de carbono, de modo que la «ventana» que el dióxido de carbono podría llenar es pequeña. Cualquier incremento específico de la concentración de dióxido de carbono de hoy —digamos, una duplicación— causará sólo la mitad del aumento de temperatura que produciría si no hubiese vapor de agua en la atmósfera. El «aumento» que correspondería a la otra mitad del incremento del dióxido de carbono ya ha tenido lugar, gracias al vapor de agua, y es parte de la subida de 34°C debida a la totalidad de la atmósfera.

Newell y Dopplick, cuyos cálculos independientes dan más o menos el mismo resultado que los de Idso para el probable efecto invernadero debido al dióxido de carbono, subrayan que en realidad es el vapor de agua, y no el dióxido de carbono, el gas que predomina en la absorción atmosférica de la radiación infrarroja emergente, y sugieren que las altas cifras obtenidas con los modelos MCG se deben a un error. Los modelos suponen que la evaporación de los océanos en los trópicos aumenta a medida que sube la temperatura. Esta hipótesis nunca se ha comprobado en la práctica. Incluso si fuera correcta, Newell y Dopplick afirman que deben incluirse las variaciones de nubosidad en los modelos antes que se pueda dar crédito a los cálculos de éstos. Un aumento de la evaporación produciría más nubes, más nubes reflejarían una mayor proporción de la energía solar incidente, y esto compensaría la influencia del refuerzo de efecto invernadero. Los movimientos del calor «controlados» por el dióxido de carbono son sólo un 10% de los «controlados» por el vapor de agua, según Newell y Dopplick, con lo que llegan por distinto camino a la misma conclusión que Idso: la atmósfera ya es un invernadero infrarrojo al 90%.

Nada de esto es realmente nuevo. Todos los modelistas del clima reconocen el papel del vapor de agua y la nubosi-

dad, y están de acuerdo en las deficiencias de los MCG. Aun así, el calentamiento debido al dióxido de carbono «predicho» por los MCG se cita a menudo en cifras garantizadas, de modo que es importante describir aquí cuáles son los defectos de los MCG. El argumento sólo se resolverá cuando el calentamiento global se haga lo bastante notable como para ser detectado y medido. Cualquiera que sea el calentamiento, debe de haber un límite; pero cualquiera que sea el límite, debe de haber *algún* calentamiento. Las pruebas disponibles hasta ahora no están a favor de los MCG, pues según algunos teóricos el aumento de temperatura predicho por los modelos tridimensionales del clima debería ya ser detectable, y no lo es. Irónicamente, una de las personas que han indicado esto en tiempos recientes (en un artículo de *Science* con Roland Madden) es V. Ramanathan, del NCAR, quien fue uno de los primeros climatólogos que criticó la idea de Idso de que todos los MCG estaban cometiendo la misma equivocación.

¿DÓNDE ESTÁ EL AUMENTO ESPERADO?

Madden y Ramanathan comentaron que la inherente variabilidad del clima hace difícil la detección de cambios debidos a la acumulación del dióxido de carbono: esto es algo que debe haber quedado claro después de leer el primer capítulo. Sin embargo, prosiguieron considerando los cambios climáticos debidos al CO_2 como una «señal» en contraste con la variabilidad natural del clima y trataron de calcular lo notable que debería ser dicha «señal».

Mediante datos de temperatura media mensual de lugares del mundo próximos a la latitud 60°N, en el período de 1906 a 1977, pudieron obtener una representación física de la magnitud de la variabilidad natural durante el presente siglo. A lo largo del mismo intervalo de tiempo, el aumento observado en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, combinado con los modelos informáticos, predice que el cuadro completo de variabilidad debería haberse corrido en bloque hacia temperaturas más altas en cuantía mensurable.

Cuando pasaron todas las estadísticas en el computador. Madden y Ramanathan hallaron que para esos puntos de observación «el promedio de los 20 años de 1956 a 1975 no es más alto que la temperatura media en los 20 años de 1906 a 1925: de hecho, es ligeramente más bajo (14,2°C en comparación con 14,42°C). Por tanto, no podemos aportar pruebas estadísticas de que haya habido un efecto debido al aumento de CO_2 en la presente temperatura media zonal a 60°N». Y llegaron a la conclusión de que «o bien tales modelos [los MCG] exageran en la predicción de la señal, o bien se están produciendo otros cambios climáticos compensatorios».

El «volcán humano» de Reid Bryson es el candidato más obvio para un «cambio climático compensatorio». Bryson y su colega G. J. Dittberner, de la University of Wisconsin Madison, han desarrollado un modelo de cambios en el presente siglo que incluye tanto los efectos del polvo como los del dióxido de carbono, y a partir de dicho modelo concluyen que el polvo responde de hasta un 90% de la variación de temperatura en las recientes décadas, mientras que el dióxido de carbono sólo lo hace del 3%. Este es el punto de vista de una pequeña minoría, pero de estudios como los de Madden y Ramanathan se desprende que tal posibilidad ha de permanecer en el foro del debate científico acerca de los cambios climáticos actuales.

Sin dejarse amilanar por la falta de una señal detectable del dióxido de carbono en los datos de temperatura registrados hasta ahora. Madden y Ramanathan indican que los efectos, cuando se hagan mensurables, se detectarán con la máxima facilidad en ¡os registros de temperaturas estivales. Si no hay efecto de enfriamiento que compense el esperado calentamiento, entonces éste debería ser detectable en cualquier momento desde ahora hasta finales del presente siglo: antes sí los MCG se hallan cerca de la verdad, más tarde si están tan equivocados como Idso cree.

El estudio de Madden y Ramanathan apareció en agosto de 1980 y adoptó el enfoque, según parece deseable, de usar una serie de temperaturas medias tan larga como fuera posible, comparando las temperaturas de las últimas dos décadas

con las de principios del siglo XX. En agosto de 1981 se publicó otro trabajo del equipo de Hansen, del Goddard Space Flight Center de la NASA, que trataba del mismo problema, pero destacando los cambios de temperatura entre mediados de la década de 1960 y 1980, además de considerar una perspectiva más amplia. La temperatura del hemisferio norte disminuyó en unos 0,5°C entre 1940 y 1970, razón por la cual Madden y Ramanathan no hallaron un efecto invernadero detectable en su estudio aun cuando éste fue un período de rápido aumento de la concentración de dióxido de carbono. Sin embargo, aunque este enfriamiento global forma ahora parte de la historia climatológica, el equipo de Goddard indica que las últimas medidas de temperatura, divididas en regiones geográficas, ponen de manifiesto una brusca inversión de las curvas de temperatura en la última década más o menos.

Poniendo estos cambios en la perspectiva de los últimos cien años, las altas latitudes (23,6°N hasta el polo) se calentaron 0,8°C entre la década de 1880 y 1940, y después se enfriaron alrededor de medio grado entre 1940 y 1970. Las bajas latitudes de ambos hemisferios se calentaron 0,3°C aproximadamente entre 1880 y 1930, y no han variado mucho desde entonces. Las latitudes altas del hemisferio sur (23,6° S hasta el polo) se calentaron unos 0,4°C a lo largo del pasado siglo, de una forma más constante que en las altas latitudes septentrionales. Reuniendo todos los datos (véase figura 10-1), el equipo de Hansen llega a la conclusión de que «la temperatura global es casi tan alta en el presente como en 1940. El error común de que el mundo se está enfriando se basa en la experiencia del hemisferio norte hasta 1970». Desde 1970, el hemisferio norte ha empezado a calentarse de nuevo.

¿Cómo se compara este calentamiento —0,4°C globalmente desde la década de 1880— con los modelos informáticos del efecto invernadero? El equipo de Goddard ha utilizado en su estudio un modelo monodimensional de computador, el cual no tiene en cuenta las variaciones con la latitud y calcula la temperatura en toda la atmósfera promediada para todo el globo en función de la altura. Su ventaja es que, si bien es menos detallado que un modelo MCG enteramente

tridimensional, proporciona perspectiva para simular en el computador la influencia de los otros factores variables al mismo tiempo que tiene en cuenta el incremento del dióxido de carbono. El propio aumento de detalle que debería hacer los modelos tridimensionales más ajustados a la realidad no da lugar a considerar otros factores, además de hacer más cara su pasada por el computador Así pues. Hansen y sus colegas han empleado un modelo monodimensional que saben que da predicciones similares a los MCG cuando se usa el dióxido de carbono como la única variable, y han comparado las predicciones del efecto invernadero del dióxido de carbono con y sin realimentación debida al vapor de agua, con y sin los efectos del polvo volcánico, y con y sin las estimaciones (que se admite que son especulativas) del efecto de la variación de la cantidad de calor del Sol que llega a la troposfera. Tales cálculos, por supuesto, no son mejores que las estimaciones acerca de cada uno de esos factores que se introducen en el computador. Las hipótesis acerca de las variaciones solares son probablemente el punto débil: no se tenían todavía noticias de los últimos trabajos de Kondratyev y Nikolsky al otro lado del Atlántico en la época en que el equipo de Goddard llevó a cabo su estudio. En éste, el modelo preferido tiene humedad relativa constante, lo que significa que cuando la temperatura aumenta se acumula en la atmósfera más vapor de agua —la hipótesis a la que ponen objeciones Newell y Dopplick. Kandel y otros— y deja fuera del cálculo la influencia solar. Da una predicción de un aumento de la temperatura media global de 1,9°C para una duplicación del dióxido de carbono, próximo al consenso de los modelistas informáticos del clima[14]. En este modelo, las nubes altas contribuyen al

[14] Con humedad *absoluta* fija, de modo que no hay efecto de realimentación debido al aumento de vapor de agua, y con todo lo demás constante salvo el dióxido de carbono, el modelo da por resultado un calentamiento global de 1,2ºC para duplicación del dióxido de carbono en la atmósfera Resulta todavía mucho mayor que el calentamiento predicho por Idso usando un enfoque distinto, o por Newell y Dopplick utilizando su modelo informático sin realimentación del vapor de agua. Si hablásemos en términos científicos abstractos -especulando quizás acerca de la temperatura de un planeta distante- nos parecería que todas esas cifras estarían en el mismo cesto, y los cientí-

efecto invernadero neto, mientras que las nubes bajas enfrían la superficie. Sin embargo, como ocurre con todos los modelos informáticos desarrollados hasta ahora, no puede aproximarse correctamente a los efectos detallados de la cobertura nubosa.

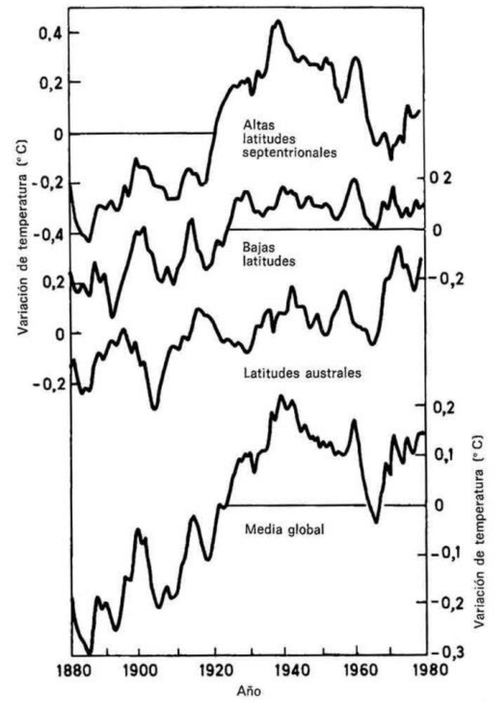


Fig. 10-1. Los mejores cálculos de las variaciones de temperatura en diferentes bandas de latitud, y para la totalidad del globo, durante los pasados cien años. Desde 1970, el mundo ha empezado a calentarse. (Fuente: J. Hansen y colegas, *Science*, Vol. 213, pág. 961, 1981.)

---

ficos se congratularían mutuamente Sólo por el hecho de que el planeta que se estudia es el nuestro, y porque las diferencias de temperatura de alrededor de un grado pueden ser tan importantes para la agricultura, nos quejamos del desacuerdo entre los dos grupos. Dándoles tiempo, llegarán a un acuerdo Pero, ¿cuánto tiempo nos queda?

Hansen también ha tomado parte en el estudio del efecto de la erupción del monte Agung en la atmósfera, de modo que su grupo tiene una sólida base con la que incluir el efecto del polvo volcánico en sus cálculos (aunque tal vez Kondratyev y Nikolsky sostendrían que están atribuyendo a esta fuente doble importancia de la que merece, ya que la mitad del enfriamiento de principios de los años sesenta fue debido, según creen los rusos, a la influencia de las pruebas con bombas nucleares). Y un equipo de Goddard encabezado por Wei-Chyung Wang ha efectuado cálculos detallados de la posible influencia de un efecto invernadero debido a gases escasos, como el metano y los óxidos de nitrógeno, de modo que, cuando el grupo de Goddard dice que el efecto neto de gases escasos antropogénicos debería ser un calentamiento de unos 0,1°C, lo cual «no altera considerablemente los análisis de la variación de temperatura durante el pasado siglo», probablemente saben lo que están diciendo[15]. En conjunto, les resulta un efecto combinado de la influencia del dióxido de carbono y la del polvo volcánico que se ase meja de modo sorprendente a la pauta de variaciones de temperatura en el mundo real a lo largo de los pasados cien años (fig. 10-2). No obstante, a partir de esta ilustración queda claro que hay otros efectos, al menos tan importantes como el efecto invernadero, que han actuado durante el pasado siglo (¿tal vez la influencia solar?), y que este estudio, como el de Madden y Ramanathan, no aporta una prueba definitiva de que el efecto invernadero actúe en el presente.

En la hipótesis de que su modelo es una buena guía del efecto invernadero. Hansen y sus colegas afirman que el calentamiento global para un mundo en rápido crecimiento («todo como siempre») sería cercano a 4°C hacia finales del siglo XXI; el crecimiento lento lo reduciría a 2,5°C, y el cre-

[15] Cuando dicen que los gases escasos «reforzarán sensiblemente el calentamiento debido al efecto invernadero en el futuro si se mantienen las presentes tasas de crecimiento», no hay que tomar la afirmación al pie de la letra. Recordemos que hay un límite para la radiación infrarroja que se absorbe: una vez cerrada la «ventana-», se gana poco añadiéndole más vidrios.

cimiento cero (o un crecimiento lento en el uso de la energía, sin empleo de carbón en el próximo siglo) causaría un aumento de sólo 1°C a lo largo de los próximos 120 años. «El calentamiento predicho debido al CO_2 se incrementa en la década de 1980... [esto] no depende de las hipótesis sobre el crecimiento del CO_2, porque las cantidades de CO_2 no difieren sustancialmente hasta después del año 2000». Las erupciones volcánicas del tipo de la del Krakatoa o la del Agung podrían retrasar el calentamiento, pero sólo unos años, y si la predicción se comprueba, los modelistas deberían poder confirmar la realidad del efecto invernadero con una fiabilidad del 85% (en términos estadísticos) dentro de diez años, y del 98% a finales de siglo.

Si los modelos informáticos son correctos y las predicciones como la de Wallace Broecker se toman al pie de la letra, para el año 2000 el mundo podría encontrarse en un estado climático no experimentado en todo el milenio anterior. Esto no es una hipótesis catastrófica, ya que nuestros antecesores de hace mil años se las arreglaron muy bien. Sin embargo, nos preguntamos, ¿es la agricultura moderna tan flexible como el labrador primitivo de 1.000 años atrás? La tendencia de la agricultura científica durante este siglo —en especial durante la segunda mitad del mismo— ha consistido en explotar los cultivos y las técnicas agrícolas bajo condiciones óptimas; pero las condiciones «óptimas» para las que esos cultivos y técnicas se han pensado son las condiciones normales de los años en los que se desarrollaron, las décadas de 1950 y 1960. La máxima preocupación acerca de la perspectiva de un inminente cambio climático en cualquier dirección procede precisamente de quienes se dan cuenta de que la agricultura moderna fue creada en función del tiempo normal de hace dos o tres decenios. Puede que hayamos ganado productividad a expensas de la flexibilidad, de modo que, si bien los años buenos son muy buenos, cualquier desviación del tiempo perfecto produce una espectacular reducción de las cosechas. Y, mientras tanto, la población mundial aumenta Las variaciones regionales del tiempo que en las predicciones se asocian a cualquier calentamiento global debido al efecto

invernadero manifiestan la importancia de tales problemas y sugieren que las consecuencias del efecto invernadero pueden caer sobre nosotros aún antes que se produzca un calentamiento global detectable.

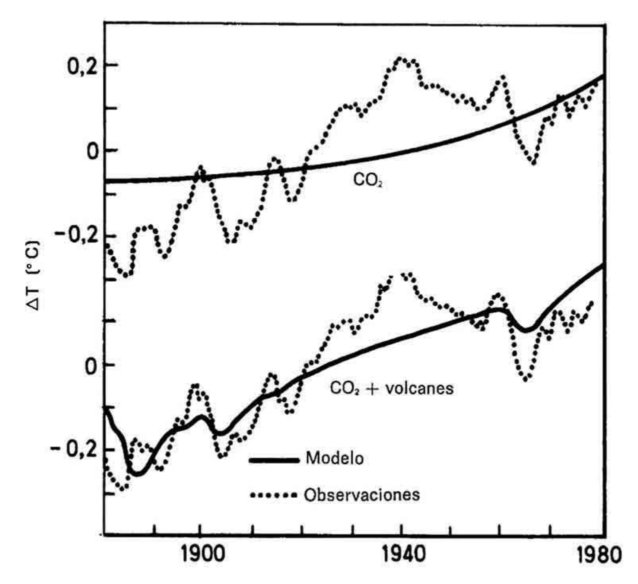


Fig. 10-2. Una combinación de dióxido de carbono, efecto invernadero y velo de polvo volcánico explica al menos algunas de las recientes variaciones de temperatura; sin embargo, intervienen también otros factores. (Fuente: J. Hansen y colegas, *Science*, Vol. 213, pág. 961,1981.)

LAS CONSECUENCIAS REGIONALES

Las temperaturas medias globales nos dan cuenta sólo de parte de la historia. El modelo utilizado por Manabe y Wetherald. por ejemplo, predice, para una duplicación del contenido de dióxido de carbono, muy poco calentamiento en los trópicos, un aumento de 10°C en las temperaturas polares, un calentamiento de 2 a 3°C en las latitudes medias, un aumento del 2% en la humedad relativa y un aumento del 7% en la precipitación media. Para investigar los detalles de los cam-

bios regionales, sin embargo, tendremos que abandonar los modelos informáticos y examinar de nuevo el modo en que ha cambiado el tiempo en el mundo de una década a otra.

La característica fundamental de los modelos MCG es que predicen un rápido aumento de la temperatura global de un grado o más dentro de la duración normal de la vida de un individuo. Aunque Idso no está de acuerdo con esto, lo esencial de su enfoque es que nos informa sobre la existencia de un límite absoluto para el aumento, que podría alcanzarse en un siglo o dos. Ambos pueden tener razón: un rápido aumento de un grado o más podría ir seguido de un aumento más lento hacia el límite de Idso (si se sigue quemando combustible fósil) a medida que se van recubriendo los últimos huecos en el invernadero global. Aun los mejores modelos informáticos, sólo pueden esbozar la manera en que las diferentes regiones del globo serán afectadas por los cambios asociados a tal incremento de las temperaturas medias; pero ha habido años cálidos y fríos en todo el mundo durante los pasados cincuenta años, período del que disponemos de buenos registros de temperatura, lluvia, etc., en muchos lugares del globo. A principios de la década de 1980, varios climatólogos trataron de utilizar tales registros para construir un cuadro de lo que sería «una Tierra caliente». Su idea se basaba en que, combinando los datos de varios años cálidos, podría construir un cuadro típico de «tiempo cálido», mientras que los datos de «años fríos» similares proporcionarían el cuadro de la «Tierra fría». La comparación de ambos constituiría una buena guía para la dirección de las variaciones asociadas al efecto invernadero, aun cuando la cuantía de esas variaciones no se pudiera predecir con detalle. Y el método parece que da buen resultado.

Dos grupos en particular fueron los primeros en iniciar este tipo de estudios. Jill Williams, del NCAR, y un equipo dirigido por Torn Wigley, de la University of East Anglia, en el Reino Unido, han enfocado el problema de manera semejante a grandes rasgos y han obtenido conclusiones aproximadamente iguales; dado que, además, éstas también concuerdan con la limitada información de los modelos informáticos, da

la impresión de que ambos van por el buen camino. Estos dos estudios, sin embargo, muestran algunas diferencias entre los pequeños cambios de la temperatura media global durante el siglo XX y los grandes cambios de temperatura que han tenido lugar en la historia reciente de la Tierra. La naturaleza de estas diferencias no es tranquilizadora para los habitantes de Europa y Norteamérica que piensan que un mundo algo más cálido haría la vida más agradable.

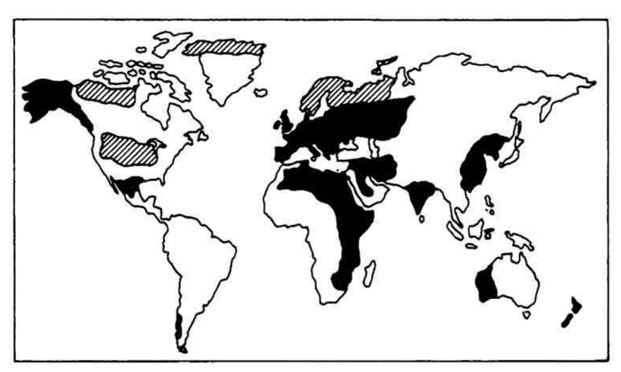


Fig. 10-3. Reconstrucción por Will Kellogg de la distribución de lluvias cuando la Tierra era más cálida que hoy día, durante el hipsotérmico, hace de cuatro mil a ocho mil años. Algunas partes del mundo (negro) eran más lluviosas que en el presente; otras (sombreado) eran más secas. No hay información para el resto de las áreas.

(Basado en la figura 13-6 de «Global Influences of Mankind on the Climate» [Influencias globales del hombre sobre el clima] de W. W. Kellogg, en *Climatic Change*, ed. John Gribbin, London y New York, Cambridge University Press, 1978.)

En primer lugar, la perspectiva amplia. Will Kellogg, también del NCAR. ha reunido las pruebas de los anillos de árboles, restos de polen, estudios de isótopos y otros datos geológicos que muestran que ha habido cuatro épocas durante los pasados dos millones y medio de años, las cuales pueden considerarse como representativas de cuatro estados progresivamente más cálidos de la Tierra. Estos son el período cálido medieval, también conocido como «pequeño óptimo», desde el año 800 al 1.200 aproximadamente de nuestra era; el hipso-

térmico, o altitérmico, de 4.000 a 8.000 años atrás; el período interglacial previo, hace unos 120.000 años, el cual duró unos 10.000 años, y la época en que por última vez el Ártico quedó completamente libre de hielos, período cálido que se extiende desde hace unos dos millones y medio de años hasta hace al menos cientos de miles de años. Kellogg eligió el período hipsotérmico para hacer una reconstrucción detallada —todo lo detallada que puede ser a partir de las pruebas de restos animales, sedimentos, etc.— que indicaría la clase de cambios que podemos esperar en un mundo dominado por el efecto invernadero. Su reconstrucción (fig. 10-3) muestra que, hace de 4.000 a 8.000 años, el norte y el este de África eran más favorables para la agricultura que hoy día. Europa era más lluviosa, y Escandinavia y las actuales regiones productoras de grano de Norteamérica eran más secas.

Si el calentamiento global que se anticipa produjese una distribución similar de lluvias, Norteamérica produciría menos grano, pero ciertas partes del norte y el este de África, el Oriente Medio, México y el oeste de Australia, que padecen ahora de sequía frecuente, podrían convertirse en exportadores de grano. Tal hipótesis lleva consigo interesantes consecuencias políticas, pues Estados Unidos ejerce hoy día considerable influencia en el mundo no sólo por su potencia militar, sino también como proveedor de grano en un gran número de países. Las consecuencias de las hipótesis deducidas de los archivos del siglo XX son todavía más «interesantes».

A partir del estudio de la University of East Anglia como representativo de los grupos que emplean este enfoque, examinemos en detalle las hipótesis. El equipo examinó en primer lugar los registros de temperatura alrededor del Ártico, en una zona comprendida entre los 65° y los 80°N, y extrajo los datos de los cinco años más cálidos entre 1925 y 1974, y los cinco años más fríos en el mismo período de 50 años, a fin de elaborar un cuadro de las diferencias entre una Tierra fría y una Tierra caliente. Los cinco años más cálidos en estas latitudes fueron 1937, 1938, 1943, 1944 y 1953, y los cinco años más fríos, 1964, 1965, 1966, 1968 y 1972. Queda claro que el enfriamiento global tuvo lugar después de la década de 1940,

pero éste no era el objetivo del trabajo. El equipo de la University of East Anglia examinó en primer lugar la zona de latitudes altas, porque los MCG predicen que las altas latitudes se calentarán probablemente por encima del promedio. La diferencia media de temperatura entre los años cálidos y fríos en esta zona (que incluye Noruega, el norte de Suecia, gran parte de Finlandia. Islandia, el norte de Canadá. Alaska y el norte de Siberia) es de 1,6°C, mientras que para el total del hemisferio norte durante los mismos años es de sólo 0,6°C. Esto parece confirmar los cálculos de computador. Comparando sólo los inviernos, los años cálidos fueron 1,8°C más calientes que los años fríos: y comparando los veranos, la diferencia de temperatura fue de 0,7°C.

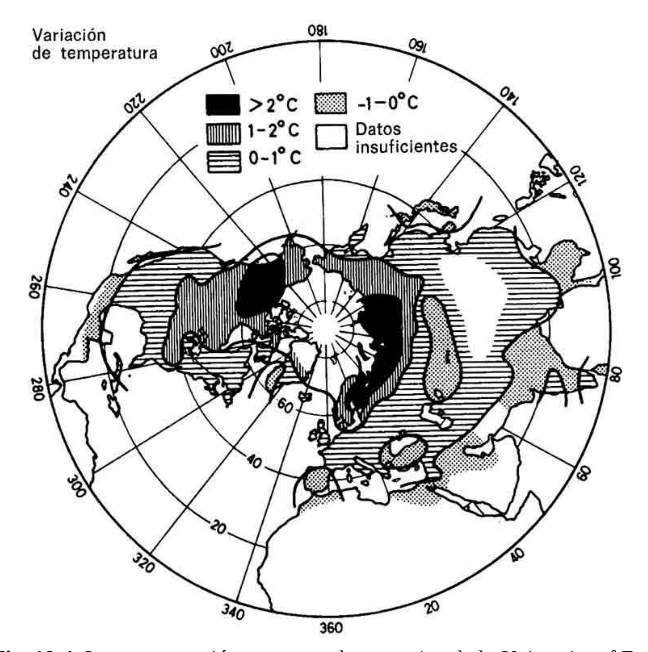


Fig. 10-4. La reconstrucción, por parte de un equipo de la University of East Anglia, de la distribución de variaciones de temperatura entre años cálidos y fríos durante el periodo de 1925 a 1974. Cualquier calentamiento global en el próximo futuro parece que tendrá un mayor efecto a altas latitudes que en las proximidades del ecuador. (Datos proporcionados por Tom Wigley.)

La figura 10-4 muestra con mayor detalle la pauta de variaciones de temperatura entre los conjuntos de cinco años más cálidos y más fríos. El calentamiento máximo se dio en las regiones inferiores continentales a latitudes altas. Una zona que se extiende desde Finlandia a través de Siberia hasta los 90°E muestra un aumento de temperatura de 3°C: en gran parte de Norteamérica la temperatura sube de 1 a 2°C, mientras que en algunos países —entre ellos Japón. India. Turquía y España— se produce un descenso de temperatura. Estas variaciones se explican meteorológicamente por corrimientos de la configuración de la circulación atmosférica, los cuales aportan una corriente del oeste intensificada y depresiones más profundas entre 50 y 70°N, y un desplazamiento hacia el oeste del anticiclón siberiano en invierno.

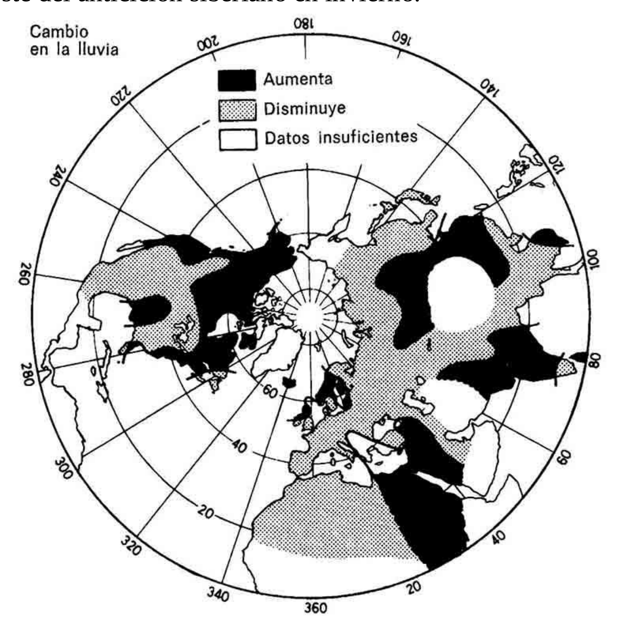


Fig. 10-5. La distribución de variaciones de lluvia asociada a las variaciones de temperatura indicadas en la figura 10-4, para un cambio de una Tierra más fría a una más caliente. La perspectiva de sequía en Norteamérica, Europa y la URSS es una de las más inquietantes si el efecto invernadero se apodera del planeta. (Datos proporcionados por Torn Wigley.)

Los años cálidos muestran también un incremento global de la lluvia del 1 al 2% con respecto a los años fríos, pero de nuevo este modesto aumento enmascara efectos regionales mayores (fig. 10-5). Se muestra una *disminución* de la lluvia sobre gran parte de Estados Unidos. Europa. Rusia y Japón, al mismo tiempo que tiene lugar un aumento superior al promedio sobre la India y el Oriente Medio. Las variaciones estacionales son tan importantes como las geográficas, con una circulación monzónica más vigorosa en los años cálidos: la distribución estacional de temperatura muestra que, por ejemplo. Norteamérica se calienta en todas las estaciones, mientras que el enfriamiento alrededor de Turquía está relacionado con una disminución de las temperaturas en primavera, y el enfriamiento en la India es máximo en verano y otoño.

En conjunto, las diferencias más importantes entre este estudio (y el de Jill Williams) y la hipótesis sobre el hipsotérmico de Will Kellogg es que Europa y Rusia son más secas, y Canadá más lluvioso que lo que sugiere Kellogg. En realidad, esto resulta perjudicial para la actual distribución de producción de alimentos —en especial grano— aunque examinaremos en detalle las consecuencias agrícolas en el capítulo 11 Las condiciones más cálidas y secas no ayudarán a las regiones productoras de grano, ni de Norteamérica, productora del actual superávit mundial, ni de la URSS, que ya es incapaz de producir suficiente grano para sus necesidades actuales. No es de extrañar que el efecto invernadero del dióxido de carbono se haya convertido en una cuestión política tan delicada.

El estudio de la University of East Anglia también pone de relieve otros puntos. Aun en un mundo más cálido, habrá variaciones interanuales de temperatura y lluvia, con algunos años más cálidos y otros más fríos, y algunos más lluviosos y otros más secos. Wigley y sus colaboradores señalan que, en cualquier caso, su estudio, como todos los de este tipo, proporciona sólo un esquema de lo que ocurriría si el mundo fuera algo más cálido, no una predicción de lo que necesariamente ha de acontecer: las razones que hicieron algunos años más cálidos que otros entre 1925 y 1974 no guarda ban relación directa con una acumulación de dióxido de carbono en la

atmósfera. Otros dos investigadores de la University of East Anglia. Chris Sear y J. M. Lough, han examinado todos estos estudios acerca de un mundo caliente y llegan a la conclusión de que, aun cuando proporcionan ideas valiosas puesto que coinciden entre sí y con otras predicciones —las de los modelos de computador, por ejemplo—, todavía hay mucha tarea que realizar. Al fin y al cabo, para algunos lugares de Europa los registros disponibles se remontan a la década de 1780, y desde entonces ha habido varios períodos de tiempo frío y de tiempo cálido. Este enfoque del problema abre grandes perspectivas a la investigación, pero hasta ahora apenas ha sido explotado.

¿POR QUÉ LA GENTE ESTÁ PREOCUPADA?

Como veremos, una combinación de aumento de temperatura, aumento de precipitaciones y aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera podría ser beneficiosa para la agricultura en muchas partes del mundo, en especial en los países del Tercer Mundo, donde el arroz es el alimento principal. Sin embargo, el comercio mundial de alimentos hoy día depende casi por entero del superávit producido en las regiones granero de Norteamérica. El superávit de Estados Unidos y Canadá es el seguro del mundo contra el hambre, y si las condiciones cambian, millones de personas podrían morir durante el período de adaptación, incluso si con el tiempo la producción de alimentos resultara mayor. Tales peligros se ponen de manifiesto si tenemos en cuenta que, incluso en el presente, el mundo podría alimentar a una población doble de la actual, y pese a lo cual millones de personas viven al borde de la inanición. Cuando se habla de lo que sería posible en un planeta más caliente, debe recordarse que las realizaciones prácticas del sistema de producción y distribución mundial de alimentos hoy día quedan muy por debajo de lo que teóricamente es posible, como lo han dicho muchos grupos en todo el mundo, entre ellos un equipo de la Science Policy Research Unit (Unidad de investigación de política

científica) del Reino Unido, en colaboración con Christopher Freeman y Marie Jahoda.

Si la agricultura fuera ya dirigida con eficacia y proporcionara una alimentación sana al máximo número de personas, ninguno de los cambios climáticos que pueden producirse en los próximos cincuenta años, sea por causas naturales o por actividades humanas, plantearía problema alguno: pero, en el mundo presente, una reducción del 10% en las cosechas norteamericanas acabaría con todo el superávit disponible para los pueblos hambrientos de otros lugares del planeta. Éste es el más inmediato y real de los riesgos asociados al efecto invernadero.

Un riesgo menos inmediato y menos real, pero al que en cierto modo se le ha dado más publicidad, es la posibilidad de inundación de las regiones costeras por el ascenso del nivel del mar cuando los hielos polares se fundan. Este riesgo parece dramático, pero de hecho es bastante remoto. Primero, consideremos lo factible. Dejando aparte los efectos sobre el hielo, un aumento de la temperatura haría que las propias aguas de los océanos se dilatasen, elevando el nivel del mar en 1 metro con respecto a un calentamiento de 5°C; esto en el peor de los casos tardaría siglos en ocurrir, y en el mejor sería imposible. En cualquier caso, pasaría mucho tiempo hasta que se calentaran los océanos, incluso si la temperatura de la troposfera ascendiese 5°C. En segundo lugar, cuando los hielos flotantes se funden no se produce aumento alguno en el nivel del mar porque el hielo flotante des plaza tanta agua como libera al fundirse, de modo que cualquiera que sea lo que le suceda a la capa de hielos que cubre el océano Ártico, no tenemos por qué preocuparnos. El peligro, en realidad, proviene de la gran masa de hielo almacenada en el continente antártico.

El hielo se funde con lentitud, y se tardaría muchos siglos en fundir el casquete de hielo antártico (o el casquete de hielo de Groenlandia, más pequeño), como respuesta a un calentamiento global; siglos durante los cuales se podría llegar a controlar el efecto invernadero, enfriando de nuevo la Tierra antes que el nivel del mar subiera de modo considerable Sin

embargo, la capa de hielo de la Antártida occidental se extiende mucho desde la costa mar adentro, en gran parte encallada en lo que de otra manera seria el fondo del océano. Bajo esas condiciones, algunos teóricos creen que un cambio de temperatura relativamente pequeño y un aumento del nivel del mar podría hacer penetrar agua del mar bajo los hielos, que se adelgazarían y acabarían rompiéndose. A medida que los bordes de la barrera de hielo se destruyeran, el peso de aquélla disminuiría, lo que la haría alejarse todavía más del fondo marino, dejando penetrar más agua bajo ella. La totalidad de la barrera de hielo de la Antártida occidental podría entonces romperse, lo cual provocaría una brusca ola de marea Hay pruebas fiables de que, hace 120.000 años, en el período interglacial anterior al nuestro el nivel de algunos mares era 6 m más alto que hoy, probablemente debido a que se había roto la barrera de hielos de la Antártida occidental. Varios especialistas, entre ellos J. H. Mercer, del Institute of Polar Studies de la Universidad del estado de Ohio, creen que la brusca ola de marea debida a la rotura de la barrera de hielo de la Antártida occidental se podría producir dentro de los próximos cincuenta años. La mayor parte de sus colegas discrepan de ello, y recuerdan que el hipsotérmico fue un período de calentamiento global, en contraposición con el presente, pese a lo cual la barrera antártica occidental decididamente no se rompió.

La «amenaza» de tal rotura, no obstante, proporciona titulares espectaculares en los que se dice que Florida. Texas y el golfo de México se inundarían, afectando a millones de personas y produciendo pérdidas superiores a 100.000 millones de dólares. Con reactores nucleares ubicados en las costas, así como muchas grandes ciudades —Londres, Leningrado, Washington. D.C., Amsterdam, Venecia, Calcuta y Singapur—, una marea provocada por la rotura de la barrera antártica occidental parece que llevaría irremediablemente a un gran desastre mundial. La verdad —incluso si llegase a ocurrir— es algo más prosaica.

Stephen Schneider y Robert Chen han realizado un estudio de las consecuencias en Estados Unidos. Un aumento del

nivel del mar de 5 a 8 m. producido en el curso de un año o dos, afectaría directamente a un 5,7% de la población de los Estados Unidos continentales y casi borraría Florida del mapa, pero su efecto sobre el producto nacional bruto, según Schneider y Chen, sólo sería ligeramente mayor que el embargo de crudos de 1974. Tal ascenso del nivel del mar en el curso de una década —todavía muy rápido en términos glaciológicos— produciría un impacto mucho menor. La conclusión de ello es que si Estados Unidos pudo afrontar, aun con alguna dificultad, la crisis del petróleo de 1974, el mundo sería capaz también de hacer frente incluso a una marea debida a la rotura de la barrera antártica occidental. Ante esto, los catastrofistas que sostienen la urgente necesidad de tomar medidas para controlar la emisión del dióxido de carbono antes que el mundo sufra un daño irreparable han de demostrar que el remedio no es peor que la enfermedad Podría tal vez, resultar menos oneroso para la economía mundial y los sistemas sociopolíticos dejar que el cambio climático siguiera su curso y aprender a vivir con él, que tratar de acomodarse a una vida sin el uso de combustible fósil.

¿QUEMAR MENOS?

Una de las dificultades que se presentan al tratar de planificar formas de enfrentarse con la acumulación de dióxido de carbono —la solución de «tecnofijar»— es la incertidumbre existente acerca del probable crecimiento de la demanda global de energía y de la mezcla de combustibles que se usarán durante los próximos 50 a 100 años Muchos planes anteriores a 1975 se ven ahora ridículos, pero, incluso hoy, los especialistas en energía no pueden ofrecer previsiones para el futuro. Este libro trata del tiempo atmosférico, no del pronóstico de la energía, y autores de gran prestigio han escrito obras mucho más voluminosas que la presente en su intento de proporcionar bases fidedignas para hacer planes sobre la energía. Sin embargo, de esta masa de información, a veces contradictoria, pueden extraerse dos puntos de vista que nos

dan una idea de las posibilidades con que ahora se enfrenta el mundo. He elegido el «mejor» y el «peor» de los cuadros representativos de una serie de estimaciones efectuadas en 1978 por un equipo del Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) de Austria: no pretenden representar las más ajustadas y fidedignas orientaciones existentes, sino indicar el tipo de pronósticos con los que operan los expertos en energía.

Hacia mediados de los años setenta, el consumo total de energía en el mundo era de unos 7,5 teravatios (1 TW = 1 billón de vatios). De este total, los países desarrollados utilizaban unos 5,8 kilovatios (kW) per capita, y los países en vías de desarrollo alrededor de 0,45 kW per capita. Las predicciones de la futura demanda de energía dependen de hipótesis sobre la cantidad de energía usada por cada persona en el mundo sobre el número total de individuos. Varios estudios han demostrado actualmente que sólo con modestos esfuerzos para usar con mayor eficacia la energía, el rico Norte, podría mantener un nivel de vida creciente sin incremento en la cantidad de energía usada por persona hasta bien entrado el siglo XXI. Dicho estudio, referido al Reino Unido pero aplicable a todos los países desarrollados, fue publicado en 1979 por el Instituto Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo (IIMAD) Un grupo dirigido por Gerald Leach mostró que, incluso si la demanda se triplicase para el año 2025, el uso de tecnologías sencillas y probadas podría asegurar que no se incrementase el consumo de energía en el Reino Unido.

Estas previsiones no implican el hecho de «apretarse el cinturón» o pasar sin nada, sino que dan por sentado lo que ahora parece un futuro bastante halagüeño, con «todo como siempre» y creciente adquisición de neveras, lavaplatos. TV en color, automóviles, etc. Los ahorros de energía provienen de un empleo más eficaz de los combustibles, por ejemplo en los automóviles particulares (en los que ya ha habido notables mejoras), aislamiento de edificios, etc. Tal previsión tiene extraordinarias consecuencias en lo que respecta a la planificación, entre las cuales no es la menor el ahorro de 30.000 millones de libras esterlinas durante 30 años con respecto a la

actual previsión del Departamento de Energía del Reino Unido, pero sin construir tantas plantas generadoras. Este ahorro compensaría una parte importante del costo de las medidas de uso eficaz de la energía, y la energía nuclear apenas si entra en el cuadro.

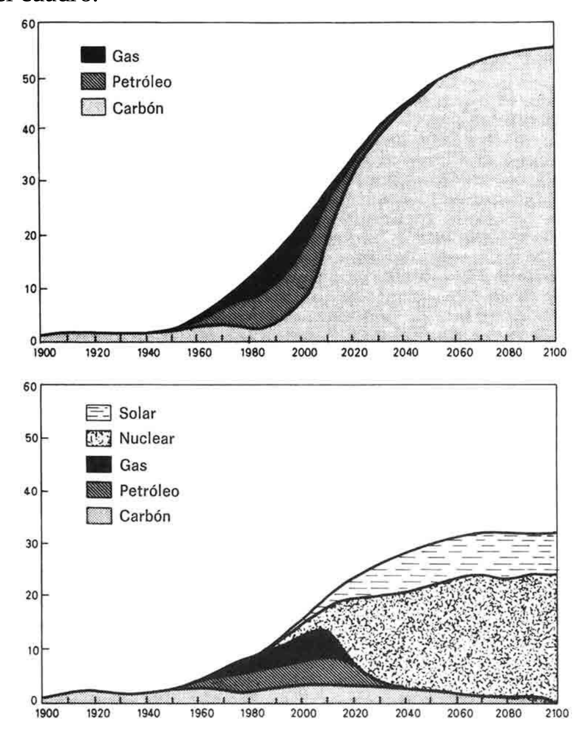


Fig. 10-6. Dos hipótesis energéticas ponen en contraste las «opciones» nuclear y de combustible fósil. El diagrama de arriba es el «peor caso» posible para la acumulación de dióxido de carbono, con un crecimiento de la demanda mundial de energía que alcanza 50 TW, siete veces superior al nivel de 1980, y la mayor parte de ella proveniente del carbón. El diagrama de abajo es la opción nuclear, en la que la energía solar ejerce una función secundaria y el empleo de combustibles fósiles disminuye durante el siglo XXI. Los máximos niveles de demanda en esta hipótesis sólo alcanzan 30 TW. Por supuesto, es posible imaginar otras muchas hipótesis intermedias; estas dos se han elegido simplemente para poner de relieve los dos extremos de opciones a las que puede acceder la humanidad. (Datos de los estudios del IIASA proporcionados por Jill Williams.)

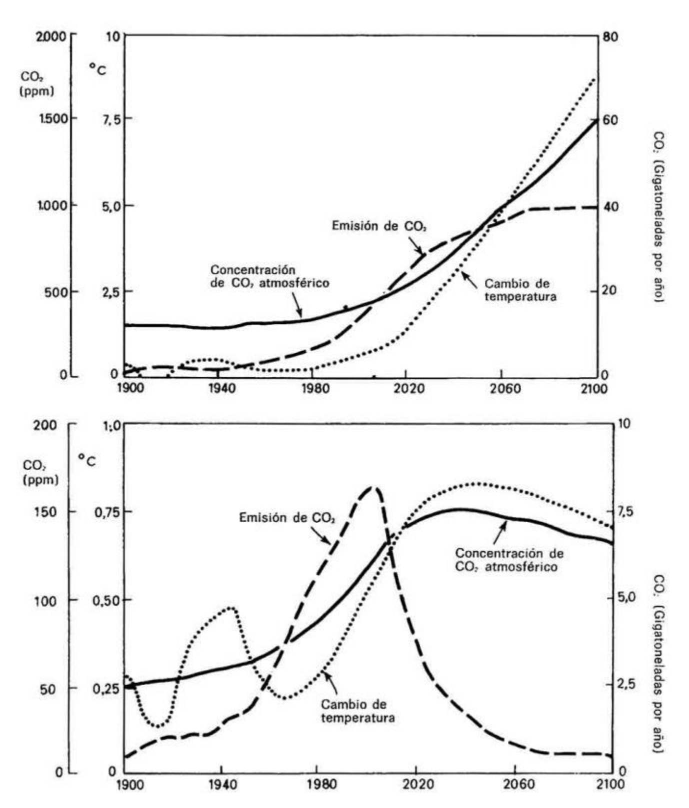


Fig. 10-7. Comparando el modelo informático típico del efecto invernadero debido al dióxido de carbono, es posible calcular el calentamiento global asociado a cada una de las hipótesis de la figura 10-6. En la hipótesis de los 50 TW con combustible fósil (izquierda), la emisión de dióxido de carbono y la temperatura siguen subiendo durante todo el siglo XXI. En la hipótesis nuclear/solar de 30 TW (derecha), las emisiones de dióxido de carbono descienden con rapidez después del año 2000, y las temperaturas nunca suben más de medio grado por encima del nivel de 1980. Téngase en cuenta la diferencia de escala entre los dos diagramas. (Fuente: Jill Williams, NASA.)

En el mundo actual, las cosas son diferentes. En el momento de escribir esto, el Reino Unido parece que impulsa entusiásticamente el programa nuclear, mientras que su política ha desencadenado un descenso tan notable de la productividad y la actividad industrial que las previsiones del IIMAD,

descritas como «todo como siempre» hace muy pocos años, dan ahora la impresión de ser de crecimiento extremo. Los expertos prevén ahora un futuro sin apenas incremento de energía, mientras que hacia finales de los años setenta, el consumo real de energía en el Reino Unido estaba ya por debajo del consumo a principios de la década en términos anuales. En el resto de Europa tienen lugar cambios análogos, y Estados Unidos empieza a seguir el ejemplo. Frente a este panorama, y tras haber mentalizado a todos los planificadores del mundo desarrollado sobre la necesidad de emplear eficazmente la energía, no hay razón para esperar que el consumo de energía per cápita en los países desarrollados aumente en el futuro inmediato. Suponiendo que los países en vías de desarrollo aspiren al mismo nivel de consumo, la estimación más razonable de la demanda de energía en un mundo del siglo XXI plenamente desarrollado es de 5 kW por persona y año.

Las previsiones del IIASA siguen precisamente esta línea de base Para cubrir un intervalo de cifras de crecimiento de la población y tener cierta flexibilidad en los cálculos, el estudio del IIASA toma una necesidad «baja» de energía de 30 TW y una necesidad «alta» de 50 TW para el año 2025 Estas son, respectivamente, cuatro veces y casi siete veces la demanda global de energía por año a mediados de la década de 1970. Después del año 2025 aproximadamente, la demanda de energía debería nivelarse con rapidez a medida que la población empieza a estabilizarse: los bajos índices de nacimientos son una característica de todos los países desarrollados, y esta demanda de energía supone un mundo completamente desarrollado. Las otras y desagradables posibilidades no conducen a problema energético alguno. Una guerra nuclear en gran escala, o la muerte por inanición en masa en los países pobres, «resolverían» el problema energético de golpe.

Cada una de esas previsiones de demanda de energía se podría satisfacer mediante diversos combustibles en diferentes combinaciones, pero, de nuevo buscando la sencillez, elegiremos los dos casos más extremos con res pecto a la acumulación de dióxido de carbono. Uno depende en gran

medida de la energía nuclear, y el otro, del combustible fósil; así, la «peor» hipótesis es la de 50 TW, con una fuerte dependencia de los combustibles fósiles. En esta estimación, la concentración de dióxido de carbono se incrementa durante el siglo XXI, y a la larga llega a ser ocho veces la concentración preindustrial. Las temperaturas globales suben de modo espectacular después del año 2020 aproximadamente, superando en 5°C los niveles actuales en el año 2060 y en 8°C en el año 2100 (lo cual supone, en primer lugar, que la mitad del dióxido de carbono desprendido permanece en el aire y, en segundo lugar, que los MCG proporcionan una buena orientación con respecto a los cambios de temperatura que se producen).

En el otro extremo figuraría un mundo de 30 TW por año con fuerte dependencia de la energía nuclear: sería improbable que se produjese un efecto invernadero detectable, ya que la concentración de dióxido de carbono nunca alcanzaría el doble del nivel preindustrial (véanse figs 10-6 y 10-7). Por supuesto, ninguna de las dos hipótesis es realista, y todas las suposiciones en que se basan son cuestionables. La verdad, en lo que se refiere a la acumulación del dióxido de carbono, se halla probablemente entre esos extremos. A la vista de tantas incertidumbres, no es de extrañar que la reacción de muchos planificadores haya sido ignorar el problema Y podrían tener razón al hacerlo, o, al menos, en evitar la trampa de dedicar dinero y esfuerzo de investigación en un intento decidido de «tecnofijar» el crecimiento del dióxido de carbono.

EL COSTE DEL CONTROL

Hay, sin embargo, consecuencias en la política a seguir sobre el efecto invernadero que dan que pensar. La más evidente, tal vez, es la del reciente entusiasmo entre los planificadores de Estados Unidos por los *synfuels*, combustibles sintéticos que se obtienen convirtiendo el carbón en petróleo y gas. Por cada unidad de energía producida, estos combustibles desprenden 2,3 veces más dióxido de carbono que el gas

natural. 1,6 veces más que el petróleo y 1.4 veces más que el carbón. Esta es la clase de cifras que deberían entrar en los cálculos de los planificadores, al menos para inclinar la balanza en caso de que fuera necesario tomar una decisión sobre si seguir adelante con los *synfuels* o con otra fuente de energía casi igual de atractiva. El problema técnico real respaldado por algunos optimistas tecnológicos, lleva consigo bastante más que esto.

Si estamos de acuerdo en que el dióxido de carbono en la atmósfera es perjudicial, hay dos maneras de atacar el problema. Una es producir menos: optar por la energía nuclear antes que por los *synfuels,* quizás, o mejorar la eficacia y concentrarse en fuentes de energía renovable (¡pero traten de decirle eso al Tercer Mundo!). La otra alternativa es hallar la forma de extraer dióxido de carbono del aire, o de las chimeneas de las centrales térmicas, y almacenarlo indefinidamente. Esta es la tecnofijación.

Una de las ironías que comporta la acumulación de dióxido de carbono es que los países desarrollados no van a ser los principales ofensores durante las próximas décadas, sino que son los más preparados para desarrollar una tecnofijación. Sin embargo, no parece factible extraer dióxido de carbono del aire en una escala suficiente para reducir la concentración global. El principal problema es que, aun con la acumulación debida a las actividades humanas, la concentración es muy baja: unos cientos de partes por millón, o 0,03%. En el sexto informe del programa de evaluación e investigación sobre los efectos del dióxido de carbono del Departamento de Energía de Estados Unidos, publicado en 1980, Anthony Albanese y Meyer Steinberg manifestaron que sólo es posible eliminar cantidades apreciables de dióxido de carbono del aire usando potentes aspiradores que absorbieran enormes cantidades de éste para su tratamiento. La potencia para accionar estos ventiladores ha de provenir de alguna parte: y si la fuente fuera electricidad de una central térmica que consumiera combustible fósil, el combustible quemado para proporcionar esa energía desprendería tanto dióxido de carbono como el que extrajera del aire la planta de procesamiento. Argumentos simila-

res se aplican a la eliminación del dióxido de carbono del aire por congelación: se puede hacer, pero el coste de energía es demasiado alto.

Resulta más fácil eliminar cantidades apreciables de dióxido de carbono de los gases efluentes de grandes centrales térmicas, pero eso no resuelve el problema de qué hacer con él. Una propuesta consiste en inyectar el dióxido de carbono en las profundidades oceánicas, tal vez mediante una tubería que llegase a la capa de agua que sale del Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar Esta corriente fluye en las profundidades y pasa al océano Atlántico, donde se junta con una poderosa circulación oceánica profunda que tardaría miles de años en dejarlo escapar a la superficie. No obstante, aun cuando la concentración de dióxido de carbono en los gases efluentes es unas 500 veces la de la atmósfera, el estudio del Departamento de Energía índica que sigue siendo difícil lograr que grandes cantidades se disuelvan en el agua del mar El sistema que el estudio propone como el que utiliza menos energía es la eliminación del dióxido de carbono de los gases efluentes mediante monoetanolamina (MEA). El dióxido de carbono se extrae después de la MEA por calentamiento y se almacena: la MEA se recicla. Y el dióxido de carbono concentrado que se obtiene de esta manera se puede transportar fácilmente y, permite deshacerse del mismo, ya sea en forma líquida o sólida. El dióxido de carbono sólido, o hielo seco, se podría, con una modesta refrigeración, llevar en barcazas a una fosa oceánica y arrojarlo por la borda. Dado que es más denso que el agua, el hielo seco se hundiría y con el tiempo se fundiría, desprendiendo gas que se disolvería en las profundidades marinas, fuera del contacto con la atmósfera durante milenios. En forma líquida o gaseosa, el dióxido de carbono se podría transportar desde una central térmica mediante una larga tubería a las profundidades oceánicas, a unos 150 km de la costa en el caso de Estados Unidos. El factor fundamental cuando se evalúan tales propuestas desde el punto de vista práctico no es tanto el coste en dinero como el coste en energía, y aquí es donde fallan.

Según el estudio del Departamento de Energía de Estados Unidos, extraer y eliminar la mitad del dióxido de carbono de los gases efluentes por barboteo mediante MEA reduciría el rendimiento de la central térmica en aproximadamente 50%, y por tanto aumentaría el coste de la electricidad en la misma proporción. Para una eliminación del 90% del dióxido de carbono, la electricidad producida sería al menos tres veces más cara, y tal vez más.

Hay un grupo contrario en este debate. Cesaro Marchetti, en el IIASA, ha calculado que el lavado de gases efluentes para eliminar dióxido de carbono, empleando técnicas semejantes a las utilizadas hoy día para extraer dióxido de azufre, se podría hacer al coste de sólo unos dólares por tonelada de carbono recogido, hasta el punto de extraer un 50% del dióxido de carbono presente. C. Mustacchi y sus colaboradores, del grupo de Análisis y Desarrollo de Sistemas de Energía, en Roma, se han atrevido a afirmar incluso que «no hay grandes dificultades, y sólo originaría un costo moderado» extraer dióxido de carbono de los efluentes. El costo adicional total de la electricidad generada, según calculan, no sería superior al 20%

Aun cuando resultara que los optimistas estén en lo cierto, sus consoladores cálculos no tienen en cuenta el hecho de que, en el mundo real, el crecimiento de consumo energético en el futuro inmediato estará concentrado en el Tercer Mundo y no en los países ricos, donde la pericia tecnológica y, tal vez, el deseo de emprender la tecnofijación del dióxido de carbono ya existen. Un costo adicional de la energía de un 20% representa una enorme carga para un país en vías de desarrollo, y es difícil imaginar una auténtica perspectiva de control del dióxido de carbono por extracción del mismo de los efluentes de las centrales térmicas. Algunas de las otras ideas que surgen de vez en cuando son aún más extravagantes y poco realistas. Sazonar deliberadamente la atmósfera con polvo —un volcán artificial— para atenuar la radiación solar, o dispersar discos de plástico reflector en la superficie del océano para reflejar la energía solar y enfriar la Tierra, son solamente dos de las ideas que se han propuesto en conferen-

cias científicas durante los últimos años. Sin embargo, la voz de la razón todavía prevalece en la mayoría de los debates científicos sobre este punto, y ello permite alimentar cierta esperanza.

MOTIVOS PARA LA ESPERANZA

El costo del control de las emisiones de dióxido de carbono a escala global es demasiado alto para poder pagarlo. Una tecnofijación paralizaría el crecimiento de las naciones en vías de desarrollo y haría que los países pobres del mundo fueran cada vez más pobres, mientras que los ricos seguirían viviendo muy bien. En cualquier caso, esto no significa que no se puedan tomar medidas para minimizar, sin excesivo esfuerzo, cualquier acumulación de dióxido de carbono. Uno de los enfoques, como dice Stephen Schneider, consiste en «diversificar las inversiones». «En lugar de jugar nos todo el futuro de nuestra energía con una apuesta de 88.000 millones en *synfuels*», sostiene, «¿por qué no diversificar nuestras apuestas con, por ejemplo, inversiones de 8.800 millones en cada una de diez opciones diferentes?» Roger Revelle y Donald Shapero resumieron los pros y los contras de las tecnofijaciones en un artículo publicado en 1978, y concluyeron que «tal vez el aumento de la dependencia de los recursos renovables, con la consiguiente reducción de la carga de dióxido de carbono de la atmósfera, resulte la alternativa más práctica». No es mala cosa que la preocupación acerca de la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera nos haga más prudentes en nuestro uso de combustibles fósiles, tanto a nivel nacional como global, y hay efectivamente otras fuentes de energía no sólo en el horizonte, sino muy próximas a nosotros.

El alcohol hecho de maíz es ya un combustible práctico para automóviles: un camino abierto por investigadores suizos en 1980 animó al premio Nobel Sir George Porter a predecir que la fotosíntesis artificial, separando el agua en hidrógeno (como combustible) y oxígeno por medios fotoquímicos,

podría convertirse en una realidad práctica dentro de una década, y en Holanda, investigadores del Instituto de Física Atómica y Molecular informaron en 1981 del desarrollo de una nueva técnica que reduce radicalmente el costo de la fabricación de células solares para generar electricidad.

Es muy posible que antes del final del presente siglo, el problema del dióxido de carbono haya desaparecido, no debido a un ataque coordinado del problema por parte de científicos, tecnólogos y planificadores, sino gracias a que las otras fuentes de energía se han desarrollado por razones económicas mucho más apremiantes. Quizá la mayor amenaza a esta perspectiva reside no tanto en las demandas industriales y domésticas de energía como en las demandas de alimentos. Una de las grandes incógnitas de todo el de bate sobre el dióxido de carbono es determinar en cuánto contribuye la destrucción de los bosques tropicales a la acumulación de aquél en la atmósfera. Hay muchas razones para preservar lo que queda de este recurso biológico único: en el presente contexto, lo importante es saber que los bosques de las zonas tropicales lluviosas contienen el 42% de todo el dióxido de carbono existente actualmente en la vegetación terrestre, y todos los bosques del mundo juntos dan cuenta de aproximadamente el 90% del carbón vegetal, aun cuando los bosques densos cubren sólo un 30% de la tierra firme del globo. Al actual ritmo de destrucción, ya no habrá bosques tropicales a finales de este siglo, y esa total eliminación de una importante pieza del medio ambiente puede tener repercusiones mucho más dramáticas que el desprendimiento de dióxido de carbono por quema de combustibles fósiles. En cualquier caso, los bosques no se destruyen para proporcionar alimento a los países del Tercer Mundo. En lo que Norman Myers llama «la relación con la hamburguesa», casi el 40% de la cobertura boscosa de Centroamérica se ha convertido en pastos para alimentar al ganado que a su vez acaba en los productos de la industria de alimentos enlatados de Norteamérica. Economizar en los alimentos —o eliminar el despilfarro— puede ser una contribución más práctica hacia la solución del problema del dióxido de carbono que economizar energía, al menos

para quienes viven en países desarrollados. Y tal vez la agricultura proporcione la solución de dicho problema por otros caminos.

Después de todo, resulta que las mejores predicciones climáticas que podemos hacer para el futuro inmediato —hasta finales del presente siglo— siguen siendo las de esperar lo que ha ocurrido ya con anterioridad, es decir, variaciones interanuales dentro del margen observado durante los últimos 200 años. Si hay una contribución por efecto invernadero a temperaturas crecientes y a desplazamientos regionales tanto de la distribución de temperatura como de precipitaciones, los agricultores serán los primeros en sentir esos efectos Así, los esfuerzos que se hagan para minimizar el impacto de la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera deben concentrarse en mejorar la eficacia de la agricultura Esta forma de proceder tiene la ventaja de que, si los catastrofistas están equivocados y el clima no cambia sensiblemente, las mejoras en la agricultura serán de inmenso valor en un mundo cuya población aumenta todavía con rapidez. Lo peor que podría ocurrir si optásemos por una tecnofijación sería la inversión de miles de millones de dólares en tecnología que resultara innecesaria, lo peor que puede ocurrir si impulsamos la agricultura es que morirá de hambre menos gente. En un mundo donde el clima varía en todas las escalas de tiempo a partir del decenio, la inversión más importante hoy debe aplicarse a la agricultura. Si la acumulación de dióxido de carbono aumenta nuestra preocupación acerca del cambio climático, es simplemente una razón más para invertir en una mejor producción de alimentos, en especial en el Tercer Mundo. Y hay grandes posibilidades de mejorar la agricultura hasta un punto en que el cambio climático más probable en los próximos cien años no represente amenaza alguna.

XI. PENSANDO EN LOS ALIMENTOS

Para cualquier persona que trate de sacar algo en claro del debate sobre las futuras tendencias del tiempo, los pronósticos de los expertos parece que difieren tanto uno de otro que se tiene la impresión ríe que ninguno de éstos sabe muy bien lo que dice. Sin embargo, el problema radica en la especialización de la ciencia actual: los expertos están tan concentrados en su materia de estudio que pocos de ellos perciben el cuadro general Dicho problema se pone de relieve en la reacción inicial de todos los climatólogos a la posibilidad de una acumulación de dióxido de carbono: ésta consistió en examinar los efectos sobre la agricultura en términos de sequía, inundaciones. etc., los efectos físicos con los que ellos, como científicos físicos, estaban familiarizados. Sólo cuando los biólogos y los expertos en agricultura se enteraron de las noticias y respondieron a ellas, la comunidad recibió el aviso, tal vez crucial, de que uno de los otros efectos del incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera podía ser el aumento del rendimiento de la fotosíntesis en las plantas, mejorando las cosechas e incluso la eficacia con que las plantas hacen uso del agua disponible. No significa que ninguno de los dos grupos de especialistas esté «equivoca do» en su valoración del problema, sino que tienen perspectivas distintas sobre una compleja cuestión En cualquier caso, ahora ha contribuido al debate un número suficiente de expertos para que una persona sin grandes conocimientos sobre el tema pueda seguir el hilo de los argumentos y llegar a formarse una idea general de la cuestión. De todos modos, es necesario investigar mucho más. en primer lugar para establecer la cuantía del efecto invernadero, y en segundo lugar, para determinar el efecto del cambio sobre la agricultura mundial Mientras que los detalles tal vez varíen, es probable que las líneas generales sigan siendo las mismas y éstas pueden esbo-

zarse examinando el conjunto de diversas opiniones y las razones por las que difieren unas de otras Como lo; pesimistas y los catastrofistas son quienes llevan a cabo la mayor parte de la acción (tanto científica como en el debate público) sobre el efecto invernadero durante la última década, quizá se hayan ganado el derecho al puesto de honor en este estudio.

LOS PESIMISTAS

¿Cuáles podrían ser los resultados perjudiciales del efecto invernadero sobre la agricultura mundial en el futuro inmediato? Tal valoración depende de lo bien que podamos pronosticar no sólo el probable aumento de temperatura, sino también la distribución de precipitaciones en un mundo más caliente. Hasta ahora, la única manera de hacer esto, como hemos visto, es comparar las distribuciones de lluvia correspondientes a distintas épocas de la historia —y prehistoria— en las que la temperatura media mundial era diferente de la actual. Los críticos de este enfoque argumentan que no sabemos por *qué* estaba la Tierra más caliente en ciertas épocas del pasado, y que un calentamiento debido al efecto invernadero podría producir una distribución de lluvia diferente, por ejemplo, de la que causaría un ligero aumento de la emisión solar. Sin embargo, parte de la fuerza del argumento ha quedado eliminada por estudios de burbujas de aire aprisionadas en hielos polares, que muestran cómo ha variado la concentración del dióxido de carbono a lo largo de los últimos 30.000 años.

Robert Delmas y sus colegas informaron en 1980 que, en la plenitud de la más reciente glaciación, había sólo unos dos tercios de la cantidad de dióxido de carbono atmosférico que existe hoy día, mientras que otros estudios muestran que hace unos 5.000 años hubo mucho más, tal vez hasta 500 ppm durante un corto período. S. L. Thompson, de la University of Washington, y Stephen Schneider, a quien ya conocemos, resumieron las consecuencias inmediatas de estos descubrimientos en marzo de 1981, en *Nature*. Los cambios en la concentración del dióxido de carbono no son suficientes para

explicar el paso de una glaciación a un período interglacial y viceversa, pero, aun así, tiene enorme importancia para el estudio de los climas del pasado. Muy probablemente, a medida que la Tierra se enfría por alguna otra razón —tal como el ciclo de Milankovič— el océano más frío es capaz de absorber una mayor cantidad de dióxido de carbono, permitiendo que la Tierra se enfríe aún más conforme el efecto invernadero atmosférico disminuye. Tal realimentación puede explicar en parte el cambio de la temperatura en la superficie del globo desde la glaciación al período interglacial. Y si hace 5.000 años había más dióxido de carbono en la atmósfera por la razón que fuese, tal vez, no sea tan mala idea utilizar la reconstrucción de Will Kellogg de la distribución de precipitaciones en el hipsotérmico para estudiar el mundo bajo el efecto invernadero

Teniendo eso en cuenta, los pesimistas sostienen que, como el presente sistema agrícola mundial, está tan finamente ajustado a las actuales condiciones climáticas, cualquier cambio respecto a lo que consideramos tiempo «normal» ha de ser malo; mientras que el alcance del desastre aumenta, tanto más «artificial» se vuelve la agricultura. W. Bach, del Centro de Climatología Aplicada de Münster, en Alemania Occidental, figura entre los expertos que han señalado las sombrías perspectivas.

Como muestra la figura 11-1, la temperatura actual en el cinturón de maíz de Estados Unidos es exactamente la adecuada para obtener máximas cosechas. Cualquier cambio en las temperaturas estivales reduciría la cosecha, y cualquier disminución en la lluvia de julio tendría un efecto similar. Una reducción de 25 mm en la lluvia de julio corresponde a un decrecimiento del 7% en la cosecha, y el pronóstico de veranos más cálidos y secos es una mala noticia para los agricultores. Si los veranos son al mismo tiempo más cálidos y más lluviosos, los beneficios del aumento de humedad compensan las pérdidas debidas a mayor temperatura; pero todas las reconstrucciones climáticas apuntan a condiciones más calientes y más secas en esta región crítica del mundo a medida que se desarrolla el efecto invernadero, y cada aumento

de temperatura de 1°C produciría una pérdida del 11% de la cosecha, aparte de las pérdidas causadas por la mayor sequía.

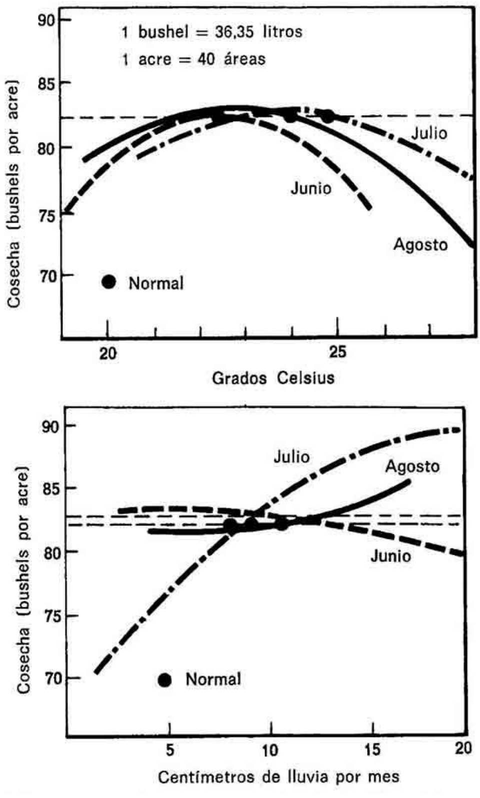


Fig. 11-1. Las cosechas de maíz en Estados Unidos están rigurosamente ajustadas a las presentes temperaturas «normales» de verano *(arriba).* Las cosechas no son tan sensibles a las lluvias, pero una combinación de condiciones más cálidas y más secas —precisamente el tipo de cambio que se espera del efecto invernadero— podría causar un serio daño en las cosechas. (Fuente: R. H. Biggs y J. F. Bartholic, «Agronomic Effects of Climatic Change» (Efectos agronómicos del cambio de clima), en *Proceedings of the Second Conference on CIAP,* ed. A. J. Broderick, Departamento de Transporte de Estados Unidos, Washington. D.C., 1973.)

El trigo, otro importante cultivo, precisa un período de crecimiento desusadamente largo en comparación con el de otros cereales, es muy sensible a los extremos tanto de calor como de frío y requiere temperaturas mínimas relativamente elevadas. Cualquier aumento de temperatura probablemente reducirá la cosecha, aunque los efectos exactos varían de una región a otra de Estados Unidos. En otras partes del mundo, en particular en Kazajstán, Bach predice que si la temperatura aumentara 1°C y las precipitaciones disminuyeran en un 10%, las cosechas de trigo se reducirían hasta en un 20%. Por supuesto, el grano de las regiones templadas del mundo no es el único cultivo. Para un tercio de la humanidad el arroz constituye su principal alimento, y, como veremos, las consecuencias de un cambio climático inducido por el efecto invernadero pueden ser muy diferentes para cultivos como el arroz, que se produce en regiones del globo más cálidas y húmedas. Sin embargo, los pesimistas arguyen que el efecto de una reducción en la producción de grano norteamericana sería devastadora para el mercado mundial de alimentos. Los precios subirían, y el superávit disponible para ayuda alimentaria desaparecería, dejando que millones de seres murieran de hambre antes de tener oportunidad de cambiar su forma de vida aprovechando cualquier mejora en las condiciones agrícolas del Tercer Mundo.

Casi todas las semanas, los periódicos publican informes sobre el déficit de alimentos en alguna parte del mundo, lo cual sugiere que los pesimistas tienen razón en estar preocupados. Poniendo un solo ejemplo, el 8 de abril de 1981, el *Guardian* de Manchester informaba del llamamiento de Vietnam a las Naciones Unidas solicitando 384.000 toneladas de alimentos con urgencia, después de haber sufrido sequía, tifones y «las peores inundaciones en las provincias productoras de alimentos del país en los últimos treinta años». Este anuncio no tiene nada de especial salvo que, tanto si el llamamiento se hace o no a través de las Naciones Unidas, los alimentos enviados como ayuda proceden con toda probabilidad de Estados Unidos, hasta hace poco el peor enemigo de Vietnam. Sólo en esa parte del mundo, hemos visto peticiones

semejantes de China, auxilio en gran escala en Kampuchea, y muchos otros ejemplos de ayudas alimentarias procedentes del templado Norte para los habitantes de las supuestamente fértiles regiones tropicales y semitropicales. Hace poco más de diez años, la gran esperanza era que la ciencia resolvería el problema gracias a la «revolución verde», el hallazgo de nuevas variedades de cultivos de alta producción adecuados a las necesidades de la agricultura en los países en vías de desarrollo; pero tal vez la razón de ser de los pesimistas hoy día es el fracaso de la revolución verde en cumplir las esperanzas depositadas en ella

Las primeras semillas de la revolución verde se sembraron en la década de 1940, cuando el gobierno mexicano y la Fundación Rockefeller establecieron un programa conjunto de investigación cuyo objetivo era aumentar la producción mexicana de trigo tanto como fuera posible y cuanto antes. Uno de los problemas clave con los que se enfrentaron era que, cuando a las variedades tradicionales de trigo se aplicaban grandes dosis de fertilizantes, las plantas crecían tanto y las espigas se hacían tan pesadas que se doblaban bajo su propio peso. La respuesta a este problema se encontró en forma de nuevas variedades de trigo con tallo corto y rígido, las cuales podían soportar hasta 135 kg de fertilizante nitrogenado por hectárea sin romperse, frente al límite de 45 kg por hectárea de las antiguas variedades. A mediados de los años cincuenta, la cosecha mexicana de trigo se había duplicado, y se volvió a duplicar diez años después. Al comienzo del programa de investigación, México importaba la mitad del trigo que necesitaban sus habitantes; a finales de la década de 1960 era un país exportador de grano. Y en los años setenta, con un crecimiento explosivo de la población. México volvía a importar alimentos.

Este es el típico ejemplo de un crecimiento de población que desborda la producción agrícola, y los pesimistas lo citan con frecuencia. Sin embargo, para el mundo en conjunto, durante el mismo período entre las décadas de 1940 y 1970, la producción mundial de alimentos se incrementó a un promedio de un 2,8% por un año mientras que la población aumentó

como término medio un 2% cada año. Hay límites al crecimiento, pero los pasados cuarenta años no nos han hecho tropezar con ellos. Son otros los problemas que, hasta ahora, han sofocado el optimismo original sobre la revolución verde.

Las variedades de trigo de alta productividad y el desarrollo del llamado «arroz milagroso» parece que habían resuelto el problema inmediato de alimentación mundial cuando países como India. Pakistán. Filipinas. México. Indonesia y Sri Lanka alcanzaron espectaculares aumentos en la producción de alimentos con su ayuda Las nuevas variedades, en efecto, se desarrollan bien bajo condiciones ideales Sin embargo, ahora parece que pueden ser menos productivas que las variedades antiguas a menos que reciban las cantidades adecuadas de agua, fertilizantes y radiación solar. Al mismo tiempo, las variedades enanas de grano con espigas pesadas son casi un regalo para los roedores, como las ratas, que obtienen comida gratis gracias al ingenio humano. La revolución verde aumentó la producción, y realmente muchas personas dejaron de morirse gracias a ella; pero, en el mejor de los casos, lo que hizo fue concedernos un respiro, un poco de tiempo para que la humanidad se enfrentase a los problemas reales, en especial el crecimiento de la población. El «fracaso» de la revolución verde es en realidad el fallo del mundo en no aprovechar ese tiempo —poco más de diez años— para al menos empezar a mantener bajo control el crecimiento de la población. Al inducir una cierta complacencia, una impresión de que la ciencia había resuelto el problema de la alimentación, la revolución verde puede incluso haber sido perjudicial, según la argumentación de los más extremados catastrofistas, porque ahora morirán de inanición muchas más personas que si el hambre se hubiera presentado en la década de 1960 y nos hubiéramos visto obligados a rectificar nuestro camino.

Las cuestiones más importantes están fuera del ámbito del presente libro. El punto más significativo es que, cuantas menos variedades hayan en nuestros cultivos, y cuanto más estrechamente se ajusten las especies, por cruzamientos selectivos, para producir cosechas óptimas bajo condiciones óptimas, tanto más vulnerables nos volvemos ante cualquier cam-

bio de las condiciones climáticas Y el alcance del problema se pone bien de manifiesto por el límite hasta el cual unas pocas variedades dominan hoy día la agricultura en Estados Unidos, recordando que este país es la cesta del pan del mundo. Hacia finales de los años setenta, sólo seis variedades importantes de maíz cubrían el 71% de la superficie dedicada a este cultivo; únicamente dos variedades de guisantes se extendían sobre el 96% de la superficie; el 72% de todos los campos de patatas estaban sembrados con una de cuatro variedades importantes, y más de la mitad de los 28.662 millones de hectáreas dedicadas al trigo estaban ocupadas por sólo 10 variedades. Una base genética tan pequeña excluye las variedades poco productivas, pero también la robustez. Si todas las plantas de trigo son idénticas, todas son vulnerables a las mismas enfermedades y a los mismos caprichos del clima. Hace cien años o más, un agricultor podia cultivar no sólo una variedad de trigo, sino toda una serie de cultivos, si uno iba mal un año, tenía otros con los que protegerse Hoy día, tanto las granjas individuales como las grandes praderas de trigo se siembran con la misma variedad. Si algo le ocurre a esa clase particular de trigo, los efectos se propagan a todo el mundo

Así pues, los pesimistas nos dicen que ya hemos andado bastante por el camino equivocado, confiando en la continuidad de las recientes condiciones climáticas y apostando por las cosechas de máxima productividad, en lugar de conformarnos con la garantía de cosechas bastante menores pero independientes de los cambios climáticos. Por otra parte, los optimistas sostendrían que no es demasiado tarde para aprender de los errores del pasado y para empezar a caminar con un rumbo diferente No sólo el dióxido de carbono estimula el crecimiento de las plantas, sino que en las regiones donde realmente es fundamental —el pobre Sur— los probables cambios climáticos pueden ser beneficiosos. Lejos de ser el desastre final para completar la destrucción del sistema alimentario mundial, el efecto invernadero podría representar la llave que abra la puerta a un nuevo mundo libre de la amenaza del hambre, y con más igualdad entre Norte y Sur.

LOS OPTIMISTAS

El primer motivo para ser optimista con respecto a los efectos sobre la agricultura de una acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera parte del propio efecto directo del dióxido de carbono sobre la fotosíntesis. Las plantas necesitan dióxido de carbono para crecer y desarrollarse, y, bajo las condiciones de invernadero, el enriquecimiento del flujo de dióxido de carbono hacia las plantas puede producir espectaculares aumentos en las cosechas. Por supuesto, las plantas de invernadero crecen bajo condiciones ideales de temperatura, fertilizantes y agua, y, en el mundo real, los beneficios potenciales de la mayor disponibilidad de dióxido de carbono pueden ser contrapesados por falta de nutrientes o agua o por temperaturas adversas. Aun así, los efectos del dióxido de carbono sobre las plantas merecen tanta publicidad, al menos, como el resto de la historia del efecto invernadero.

El profesor Norman Rosenberg, del Center for Agricultural Meteorology and Climatology (Centro de Meteorología y Climatología agrícolas) de la University of Nebraska Lincoln, ha estudiado la respuesta de las plantas comunes de cultivo a las mayores concentraciones de dióxido de carbono. Las plantas verdes se clasifican en tres grupos principales según la forma de realizar la fotosíntesis, y dos de ellos son especialmente importantes en agricultura. Las plantas llamadas C_4 comprenden el maíz, el sorgo, el mijo y la caña de azúcar, mientras las C_3 incluyen el trigo, la cebada, la alfalfa, la soja y otras muchas En términos prácticos, la principal diferencia entre las especies C_3 y C_4 es que, mientras que ambas pueden realizar la respiración por un proceso independiente de la existencia de luz, las plantas C_3 tienen un segundo sistema de respiración, llamado fotorrespiración, que sólo actúa de día Las plantas C_4 efectúan la fotosíntesis con mayor eficacia bajo condiciones óptimas, y precisan intensa luz a alta temperatura. Las plantas C_3 son menos productivas que las plantas C_4 en los trópicos, pero por encima de la latitud 45°N continúan floreciendo bastante bien, mientras que las C_4 se adaptan mucho peor. El incremento de la cantidad de dióxido de car-

bono disponible afecta a las plantas de muchas maneras, causando un aumento de la actividad fotosintética, que es más notable en las especies C_3, y un decrecimiento en la pérdida de agua desde las hojas (transpiración), el cual es más acusado en las especies C_4. Por supuesto, ambos efectos son los que el agricultor desearía.

Las concentraciones muy altas de dióxido de carbono tienen efectos perjudiciales sobre algunas plantas, pues afectan a su crecimiento y floración. Sin embargo, los estudios llevados a cabo en invernaderos que revelaron esto, implicaban concentraciones de dióxido de carbono de 2.000 a 5.000 ppm, es decir, diez o más veces la presente concentración atmosférica. En el peor de los casos, sería raro que la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera perjudicara a las plantas de cultivo, mientras que en el mejor de los casos podría aumentar las cosechas. No es probable que el efecto en sí mismo sea espectacular, ya que la productividad en la mayor parte de los lugares hoy día no está limitada por la cantidad de dióxido de carbono disponible para las plantas, sino por las cantidades que se dispone de agua y nutrientes. No obstante, «si se consideran sólo los efectos directos del aumento de concentración de CO_2 en la atmósfera global», dice Rosenberg, «estimo, junto con otros, que aumentará la producción fotosintética neta de las plantas cultivadas. El rendimiento del uso de agua mejorará tanto en las plantas C_3 como en las C_4».

Uno de esos «otros» a los que Rosenberg alude es una eminente autoridad en Agricultura. Sylvan Wittwer, director de la Agriculture Experiment Station (Estación Agrícola Experimental) de la Universidad del estado de Michigan. Ha sido uno de los más severos críticos de las sombrías predicciones de perturbación masiva de la producción agrícola debida a la tendencia al calentamiento y las variaciones en la distribución de precipitaciones. El aumento de la temperatura puede ser tan bueno como malo, dice, y «los últimos cien años dan pruebas de lo que la agricultura estadounidense y sus sistemas de investigación pueden soportar, e incluso mejorar, frente a cambios climáticos». «De 1915 a 1945, los agricultores de Indiana experimentaron un aumento de tempe-

ratura de 0,1°C por año, y una variación total de +2°C durante el siglo pasado. La agricultura americana ya ha demostrado que se puede adaptar a una tendencia de +0,1°C por año», suponiendo que las fluctuaciones anuales en torno de dicha tendencia no empeoren.

Mirando hacia el futuro, Wittwer señala que el calentamiento global abriría a la producción agrícola nuevas regiones de la URSS, mientras que las zonas trigueras de invierno de Estados Unidos se podrían ya desplazar 320 km hacia el norte, utilizando nuevas variedades resistentes que va son disponibles hoy día. Y con respecto a los efectos directos del dióxido de carbono en la fotosíntesis, Wittwer afirma que «el bajo nivel actual del dióxido de carbono atmosférico puede muy bien ser el factor más limitativo en la productividad agrícola total, globalmente considerada» En los estudios en invernaderos que cita, las cosechas son máximas a concentraciones de dióxido de carbono de 1 000 a 1.200 ppm, con un potencial de incremento de la fotosíntesis de aproximadamente 0,5% por cada 1% de aumento en la concentración de dióxido de carbono para un margen ele hasta 300 ppm por encima de los presentes niveles atmosféricos. Según Wittwer, estos efectos, que se conocen desde hace veinte años o más, representan «una mina de oro abandonada» en lo que respecta a productividad agrícola, ya que, de modo sorprendente, incluso hoy día muy pocos agricultores de invernadero se toman la molestia de aportar a sus cultivos más dióxido de carbono. En cuanto a cultivos de campo, «los actuales niveles algo más altos de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre tal vez contribuyan ya de forma importante a la productividad agrícola., un posterior aumento del dióxido de carbono en la atmósfera hasta 400 partes por millón (nivel pronosticado por algunos para el año 2020) tendría probablemente como resultado un aumento de un 20% en el rendimiento fotosintético de ciertas plantas, siempre que los otros factores del crecimiento no se limitaran».

Se trata de un punto de vista extremo, pero enteramente sostenible a la vista de los conocimientos agrícolas actuales. Algunos beneficios de la revolución verde podrían haber sido

debidos al aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico. Y, corno dice Wittwer, «el propio cambio climático no debe considerarse exclusivamente en un contexto negativo. Quizás haya ciertos efectos agrícolas favorables» como resultado de las variaciones de temperatura y distribución de precipitaciones causadas por el efecto invernadero.

Éste es efectivamente el punto de vista del profesor Suresh Kumar Sinha, que trabaja en el Instituto de Investigación Agrícola de Nueva Delhi. Donde Wittwer mantiene que Estados Unidos y en el resto del mundo desarrollado se podrían beneficiar del efecto de la acumulación del dióxido de carbono sobre la fotosíntesis. Sinha, uno de los participantes en la reunión de Estocolmo sobre el efecto invernadero en febrero de 1981, sugirió que la agricultura del Tercer Mundo podría beneficiarse directamente de la variación de las pautas climáticas. Esto se hace eco (y lleva más allá) de algunas de las previsiones con frecuencia ignoradas de Bach v otros expertos del rico Norte, pero tiene mayor peso proviniendo de un miembro del Tercer Mundo.

El arroz, además de ser el alimento básico de muchísimas personas, es una planta sumamente versátil, razón por la cual se ha difundido tanto su cultivo. Se puede hallar desde Checoslovaquia, a 49°N, hasta Sumatra, en el ecuador, y desde una altitud de 3.000 metros, en el Nepal, hasta el nivel del mar. Sin embargo, es ante todo un cultivo de las regiones cálidas y húmedas de la Tierra, floreciendo incluso en Birmania, donde las precipitaciones llegan a 4.500 mm por año y muchas otras plantas serían arrasadas. El período de cultivo del arroz comienza y termina cuando las temperaturas alcanzan 15°C, y, en general, un calentamiento global alargaría dicho período, permitiría una mayor flexibilidad en cuanto al tiempo de plantar las semillas y extendería todavía más el dominio de regiones cultivadoras de arroz. Sólo una importante disminución de las lluvias reduciría las cosechas de arroz, como muestra la tabla 4; para un calentamiento de 1°C o más, las cosechas aumentarían aun si la lluvia decreciese en un 15%.

En la reunión de Estocolmo, al optimismo expresado por algunos se opuso el argumento de que los monocultivos del presente son tan frágiles que incluso dan mayores oportunidades para incrementar la productividad puede ser peligroso. El aumento de cosechas que Wittwer y otros consideran posible sólo podría lograrse mediante un gran incremento del uso de fertilizantes nitrogenados, fosfatos y otros nutrientes, mientras que el exceso de cosechas, sostienen los pesimistas, llevaría tal vez a una inevitable erosión del terreno. Si la cosecha de grano norteamericana se hundiera, el potencial de incremento de productividad en las regiones arroceras no serviría para nada: el hambre se extendería antes que fuera posible cosechar variedades mejores de arroz. La nota de cauteloso optimismo del profesor Sinha era también muy condicional, sobre la necesidad de una fructífera investigación acerca del empleo del agua, de la identificación de nuevos tipos de cultivos capaces de tolerar bien temperaturas más altas y de la reducción de la presente dependencia de grandes cosechas con respecto al uso de combustibles fósiles. Aun así, puso el dedo en la llaga del problema real del dióxido de carbono comentando que «incluso una remota posibilidad de que el CO_2 tenga electos favorables en la agricultura de algunas regiones pero adversos en la de otras puede repercutir de manera importante en la humanidad».

Tabla 4. Los efectos del cambio climático sobre el arroz

Cambio de las precipitaciones	**Cambio de temperatura (°C)**					
(%)	**–2**	**–1**	**–0,5**	**+0,5**	**+ 1**	**+2**
–15	–19	–13	–8	–0,4	0	3
–10	–17	–11	–6	–2	2	5
–5	–13	–7	–2	2	6	9
+5	–9	–3	2	6	10	13
+10	–5	1	6	10	14	17
+15	–3	3	8	12	16	19

Las cifras representan los porcentajes previstos de variación en la cosecha del arroz La producción mundial actual de arroz es de 300 millones de toneladas por año Un clima más cálido y húmedo aumentaría las cosechas. (Datos de W. Bach, obra citada.)

En este sentido, el dióxido de carbono es simplemente una pequeña parte del problema alimentario mundial. Muchas previsiones estiman una población mundial de unos 6.000 millones en el año 2000, de los que 1.500 millones corresponderían a países desarrollados y los restantes 4.500 millones a Asia, África y Latinoamérica. En las actuales condiciones de alimentación se requerirían unos 2.300 millones de toneladas de grano para alimentar a tal cantidad de población, y es probable que el efecto invernadero tenga sólo una influencia secundaria en uno u otro sentido durante los próximos y cruciales veinte años.

Sinha hace hincapié en que no todas las variedades de arroz soportan las altas temperaturas y en que, en algunos casos, el aumento de éstas podría provocar una importante disminución de las cosechas. Así pues, incluso al nivel más sencillo, para aprovechar cualquier variación climática potencialmente valiosa, los agricultores de las regiones más pobres del mundo, los más apegados a la tradición, deberían modificar las costumbres ancestrales. Un aumento de temperatura de 2°C o más podría producir efectos adversos sobre las variedades de grano que ahora se cultivan en la India, y Sinha pone de relieve la complejidad de los problemas agrícolas, señalando que la temperatura óptima para la fotosíntesis y el crecimiento no es necesariamente la ideal para el desarrollo de los granos o tubérculos, que son las partes de las plantas que sirven de alimento. En medio de las incertidumbres, manifiesta que «entre todos los factores que limitan la cosecha, el agua es en general el más significativo en condiciones de campo». Ciertas regiones que hasta hace poco no producían apenas nada se han convertido en importantes productoras de grano simplemente porque hay más agua disponible. Su investigación del problema revela que el potencial de aumento de la productividad mediante una agricultura más eficaz sobrepasa con mucho la influencia del efecto invernadero, pero si esto ha de alcanzarse hay que superar una gran dosis de inercia humana. Citando el ejemplo de las regiones secas de la India, señala que los tipos de plantas que la gente suele cultivar «no son necesariamente los mejores en cuanto a productividad o

rentabilidad. Los estudios de sustitución de cultivos han demostrado que sería posible obtener de dos a cuatro veces más productividad de la misma tierra». ¿Puede esto lograrse en el mundo real? Las condiciones alimentarias mundiales sugieren que el optimismo debe tomarse con reservas; pero la política del dióxido de carbono tal vez proporcione el incentivo para hacer el esfuerzo que claramente se precisa.

LA POLITICA ALIMENTARIA

El problema alimentario mundial es de política y pobreza, no de incapacidad de la agricultura actual de producir suficientes alimentos para proveer a la población mundial. Hace dos o tres décadas, cuando Estados Unidos tenía superávit de granos y algunas partes de África, por ejemplo, sufrían un déficit de alimentos, parecía natural ofrecer ayuda alimentaria a los países menos desarrollados. Sin embargo, un efecto indirecto de esta ayuda fue que los agricultores locales ya no tenían incentivo para continuar con los métodos tradicionales de laboreo, y la base agrícola de muchos países se hundió. Ahora, esos países dependen de la ayuda alimentaria que comenzó como un complemento a su propia producción agrícola. Limitándonos a fechas próximas. Brasil era hasta hace poco autosuficiente en alimentos. La subida de los precios del crudo en la década de 1970, sin embargo, condujo al ahora famoso experimento brasileño del combustible alcohólico para automóviles. El alcohol proviene de la caña de azúcar cultivada donde los agricultores brasileños solían producir alimentos, y el resultado es que, mientras las importaciones brasileñas de petróleo han disminuido, el país se ha convertido en un importador neto de alimentos. En muchos países donde la supervivencia de la población es literalmente una cuestión de llevarse algo a la boca, se gastan grandes cantidades de dinero en armamento en lugar de mejorar la agricultura o proporcionar una base industrial a la economía[16].

---

[16] He tratado de torios estos problemas con mayor detalle en mi libro *Future Worlds* (Mundos futuros), en el informe de la Comisión Brandt *North-South*

El optimismo de Sinha se basa más en las perspectivas de una mayor productividad agrícola que en cualquier beneficio para la agricultura relacionado con las variaciones climáticas, y, como todos los que han estudiado el problema alimentario mundial, este especialista considera el cambio climático sólo como un factor secundario. Si aprovechamos al máximo el potencial agrícola del mundo, cualquier cambio climático concebible en los próximos cincuenta años carecería de importancia. Queda claro, a partir de ciertas estimaciones, que la productividad agrícola potencial del mundo actual, utilizando simplemente en una mayor extensión los mejores métodos de la moderna agricultura, es de unas 50.000 millones de toneladas de equivalente en grano por año. La India sola sería capaz de producir 4.500 millones de toneladas de equivalente en grano por año, dos tercios de la cantidad mínima *mundial* requerida para alimentar la población de 6.000 millones de personas que se prevé en el año 2000.

La primera vez que se ven esas cifras, resultan sorprendentes y es difícil tomarlas en serio Son auténticas, pero su logro requiere algunos cambios importantes en el gobierno del mundo, como lo demuestra un par de ejemplos. En la India, tal como señala Sinha, los agricultores sacan mucho más rendimiento en cuanto al uso de la energía que los granjeros norteamericanos. Mientras que cada tonelada de maíz producida en la India requiere el consumo de energía equivalente a 50 litros de combustible diésel, cada tonelada producida en Estados Unidos implica el consumo de 306 litros, seis veces más. Para el trigo, las cifras respectivas son de 21 y 102 litros por tonelada, y para el arroz. 93 y 170 litros por tonelada. La agricultura norteamericana es ya de alto rendimiento en términos de cantidad por hectárea, e introducir más energía (en forma de fertilizantes o de mecanización) sólo podría incrementar la producción de forma marginal. Por la misma

---

A Program for Survival (Norte-Sur: un programa de supervivencia) se examina el estado de los asuntos globales hoy día en términos generales, mientras que *To Feed This World* (Alimentar a este mundo), de Sterling Wortman y Ralph Cummings, se centra en la cuestión de los alimentos.

razón, la disminución de la energía empleada sólo reduciría secundariamente las cantidades cosechadas; y, si la energía ahorrada fuese empleada por los agricultores indios, las cosechas de éstos sobrepasarían con mucho la cantidad necesaria para cubrir las pérdidas americanas.

Desde luego, esta forma de ver las cosas es muy distinta de la realidad; pero indica de dónde provienen las sorprendentes cifras de las máximas cosechas posibles y por qué el problema es de naturaleza esencialmente política.

El otro ejemplo natural considera los hechos a escala regional, y no global. Si se puede persuadir, o educar, a los agricultores para que sustituyan las especies tradicionales por otras, los resultados pueden ser espectaculares. Por ejemplo, en la región de Indore, en la India, la sustitución del azafrán por trigo en 1972 condujo a sextuplicar la cosecha, mientras que la sustitución de la soja por grama verde triplicó la cosecha por hectárea. Lo que todavía falta en el Tercer Mundo es la aplicación del mismo tipo de técnicas agrícolas científicas que transformaron la agricultura en el templado Norte en el siglo XIX, es decir, no el traspaso en bloque de métodos inadecuados para los trópicos, sino la aplicación del pensamiento científico subyacente a esas técnicas septentrionales para desarrollar sus equivalentes en bajas latitudes. Esto más la energía, el mismo problema de siempre.

A largo plazo, el rendimiento de la agricultura y el aumento de la productividad de la tierra dependen de la entrada de capital a los países del Tercer Mundo donde existe la posibilidad de mejorar las cosechas. Mayores entradas de capital a las ya desarrolladas tierras arables del rico Norte son peor que inútiles, ya que desvían fondos que podrían aprovechar otras regiones y sólo pueden aumentar marginalmente la producción. Mientras tanto, la eficaz agricultura intensiva, cultivando cada rincón de la tierra disponible, podría ser una solución provisional vital para muchos países, que tendrían un respiro durante el cual sería posible eliminar la dependencia de importaciones de alimentos y ayuda alimentaria, y habría tiempo para inversiones a largo plazo. Si todo esto suena a música celestial, ello constituye una condena del presente estado del

mundo, dividido como está en campos rivales Las soluciones provisionales a corto plazo son sólo eso, y nunca pueden resolver el problema general a largo plazo. Es asimismo una condena de la actuación de los gobiernos individuales el hecho de que en muchas de las más pobres y hambrientas regiones del mundo hoy día se podrían obtener inmediatos aumentos en la producción de alimentos mediante posibilidades tan «obvias» como éstas:

- Mantener la cubierta de plantas durante todo el año mediante el cultivo de plantas de diferentes edades y especies: método usado por muchos labradores «primitivos», pero en general abandonado con rapidez en la prisa por «modernizarse» al estilo del rico y templado Norte.
- Cubrir el suelo pelado de capas de hierba, paja, hojas, matorral o incluso láminas de plástico para mantener la humedad y proteger las plantas jóvenes.
- Utilizar todas las fuentes disponibles de nutrientes: desperdicios de hortalizas, estiércol, aguas fecales, basura, cenizas, etc.
- Alternar los cultivos para equilibrar los nutrientes en el suelo.
- Labrar a lo largo del contorno del terreno y escalonar éste en tierras inclinadas.

No se puede negar el hecho de que los alimentos y el cultivo de las tierras son cuestiones políticas. A largo plazo, el aumento de la riqueza de un país nunca beneficia a los pobres a menos que la riqueza, especialmente en forma de tierras, se redistribuya, como Keith Griffin describe en su libro *Land Concentration and Rural Poverty* (Concentración de tierras y pobreza rural). Esto no debe considerarse como un gesto romántico que sólo beneficia a los pobres. Precisamente gracias al interés por su propia tierra, o por la tierra comunal, es probable que los más pobres hagan el esfuerzo necesario para incrementar la producción, con los beneficios resultantes para todo el país. A la inversa, la falta de incentivo cuando se trabaja para otros, o se lucha para conseguir cultivos de rápi-

do rendimiento que ayuden a pagar los intereses de los préstamos, hacen que la producción de alimentos bajo el presente sistema sea en tantos casos inferior a lo que debería.

En términos científicos, nadie en el mundo debería pasar hambre en el presente o en el futuro previsible. Pero, ¿qué incentivo político puede haber para que los países del rico Norte proporcionen la clase de ayuda que los países en vías de desarrollo necesitan para avanzar por el camino de la autosuficiencia agrícola? A juzgar por los resultados conseguidos hasta ahora, las perspectivas no parecen demasiado halagüeñas. Hay, no obstante, un problema que afecta al rico Norte y que cada año atrae más la atención, el cual sólo se puede resolver ayudando a los países del Tercer Mundo. Incluso velando sólo por el propio interés, cada vez es más urgente que el rico Norte se enfrente a este problema antes que se le escape de las manos, y sólo se puede abordar con ayuda del pobre Sur. El problema es, por supuesto, el efecto invernadero debido al dióxido de carbono. Y ¿de qué mejor modo es posible conseguir la colaboración de los países del pobre Sur en la solución del problema que ayudándoles a alcanzar la autosuficiencia agrícola?

LA POLÍTICA DEL DIÓXIDO DE CARBONO

Si la acumulación del dióxido de carbono en la atmósfera se considera como una amenaza al mundo desarrollado y si los modelos informáticos se toman al pie de la letra, es evidente que una forma de minimizar la influencia de los cambios climáticos resultantes consistiría en limitar cualquier producción futura de dióxido de carbono, de modo que la concentración en la atmósfera nunca subiera por encima de un 50% más que el nivel preindustrial. Esto muy probablemente mantendría cualquier aumento global de temperatura por debajo de 1°C, lo cual apenas tendría efectos desfavorables para la agricultura septentrional. (Si Idso tiene razón, tal aumento de dióxido de carbono no ejercerá efecto detectable alguno sobre las características del tiempo.) Para lograr este

objetivo, sólo se podría permitir un modesto aumento en el consumo de combustibles fósiles hasta finales de siglo, y después se necesitarían nuevas tecnologías que se hicieran cargo de una parte importante de la producción de energía a principios del siglo XXI. Esto deja muy poco tiempo para el desarrollo e introducción de esas nuevas tecnologías, que deberían proporcionar la mitad de las necesidades energéticas del mundo para el año 2010. Aun así, tal hipótesis implica un crecimiento mundial del consumo de energía de menos de un 3% por año hasta que las nuevas tecnologías entraran en escena, y parece inconcebible que el Tercer Mundo aceptase una política deliberada de un ritmo tan lento de crecimiento, incompatible con los planes económicos generales de los países en vías de desarrollo.

Las regiones del rico Norte son las que sufrirán más como consecuencia de los cambios climáticos asociados con un mundo más caliente, y la influencia principal de esos cambios climáticos recaerá sobre la agricultura. Las naciones en vías de desarrollo se encuentran, en general, en aquellas regiones del globo donde los efectos del aumento del dióxido de carbono sobre la temperatura y la lluvia serán probablemente muy pequeños, o incluso ventajosos para la agricultura en el futuro inmediato. En este momento, el Tercer Mundo no ha prestado atención al problema del dióxido de carbono, que llega a ser insignificante en comparación a los muchos problemas, más graves y urgentes, con que enfrentarse. Cuando se le preste atención, sin embargo, es fácil imaginar que los países en vías de desarrollo adopten el punto de vista de que la acumulación de dióxido de carbono puede ayudar en realidad a sus agricultores, y presionen con el desarrollo económico basado en consumo de combustibles fósiles, dejando a los países del rico Norte que se las arreglen.

La máxima preocupación acerca del dióxido de carbono se muestra hoy día en Estados Unidos, mientras que Europa occidental no parece que considere tan urgente la solución del problema. En la URSS existe cierto interés, pero la actitud general es pensar que los problemas creados por la tecnología se pueden resolver mediante tecnología, junto con una impre-

sión rara vez expresada pero presente de que en su parte del mundo no iría mal un ligero calentamiento. Tal vez tengan razón en cuanto a Siberia y la posibilidad de más puertos en el norte libres de hielos, pero podrían tener dificultades con las cosechas de grano si regiones tales como Kazajstán se vuelven más secas. En conjunto, apenas hay esperanzas de mantener los niveles de emisión de dióxido de carbono lo bastante bajos como para evitar una rápida duplicación de la concentración atmosférica preindustrial, y, antes que despilfarrar recursos tratando de detener el aumento, es más sensato aceptarlo como algo con lo que tenemos que aprender a vivir.

La forma de minimizar el efecto de cualquier cambio climático sobre el mundo es mejorar la agricultura mundial, y esto se podría lograr si una pequeña parte de los recursos del rico Norte se destinaran a una ayuda constructiva a la agricultura del Sur. La identificación errónea del problema del dióxido de carbono, incluyendo historias macabras sobre la posible fusión de los casquetes de hielo, y la posibilidad de dirigir de forma equivocada recursos limitados a esfuerzos fútiles para atacar el problema extrayendo dióxido de carbono a gran coste y arrojándolo en el mar, son los peores aspectos de la bola de nieve, ahora en marcha, del dióxido de carbono. Los mismos recursos, dedicados a abordar el problema alimentario, podrían empezar a sacarnos de debajo de la amenaza de todos los tipos de variabilidad del tiempo.

Puede que no sea probable que en la realidad se haga el esfuerzo apropiado. Stanley Ruttenberg, del NCAR, manifestó en la reunión de 1980 de la American Association for the Advancement of Science (Asociación americana para el progreso de la ciencia) que:

«...muchos de los países que más sufrieron con los sucesos climáticos de los años setenta y que pidieron ayuda alimentaria eran exportadores netos de alimentos. La conclusión es que la falta de alimentos para algunos sectores de la población era una consecuencia de la política nacional. El cambio de las costumbres alimenticias de los europeos, soviéticos y norteamericanos, o la puesta en cultivo de las tierras actualmente en barbecho de Estados Unidos, no resolverá el problema de esos sectores de las poblaciones que son víctimas de la política, advertida o

no, de sus propios gobiernos y de aquellos que controlan el sistema de producción agrícola...».

En otras palabras. Dios ayuda a los que se ayudan.

EL TIEMPO EN EL FUTURO

Así pues, el tiempo atmosférico es sólo un factor en la compleja situación que hoy confronta a la sociedad, y es improbable que sea el factor dominante. Vivimos en tiempos interesantes, al final de un período interglacial cuya tendencia natural nos haría retornar a la plenitud de una glaciación en unos pocos miles de años. El tiempo relativamente cálido de mediados del siglo XX, de acuerdo con muchos expertos que han empleado distintas líneas de investigación en el estudio de la máquina atmosférica, probablemente también ha terminado, y si la naturaleza se saliera con la suya nos enfrentaríamos de nuevo con unas condiciones de más frío, un retorno a la «pequeña glaciación» como anuncio de la plena glaciación que vendría después. Esto sería realmente desfavorable para los países del Norte, pero apenas se notaría en gran parte del Sur. Frente a tal perspectiva, la posibilidad de un ligero calentamiento global gracias al efecto invernadero debido al dióxido de carbono casi se presenta como un grato alivio, si no fuera por la forma en que las regiones agrícolas del Norte, muy productivas, se hallan tan ajustadas al tiempo «normal». Sin embargo, no hay seguridad en la ciencia, sino sólo probabilidades, y la única predicción certera que podemos establecer acerca del tiempo durante los próximos cincuenta años es que probablemente será diferente, pero no muy diferente del de los últimos cincuenta años. Las probabilidades son demasiado escasas para justificar una apuesta tanto sobre el calentamiento como sobre el enfriamiento, y la única opción sensata es cubrir nuestras apuestas con inversiones, no en un ajuste más exacto de la agricultura para producir cosechas aún mayores si el tiempo es precisamente el adecuado, y nada o casi nada si no lo es, sino en desarrollar una mayor robustez para

asegurar que la mayor parte de las cosechas sean siempre buenas.

La incógnita del tiempo del futuro es fascinante, pero no es nada comparado con los problemas reales que se plantean al mundo hoy día, y sería un error dedicar demasiada atención a las posibilidades, ya sea de una Tierra invernadero, o bien de una «pequeña glaciación», abandonando esos problemas, reales y urgentes, de desarrollo, alimentación y energía. Lo trágico sería que la «amenaza» del efecto invernadero llevase a una búsqueda cara y mal concebida de una tecnofijación, gastando recursos que se podrían emplear con mayor provecho en mejorar la agricultura mundial y reducir su susceptibilidad a todas las variaciones del tiempo. Este es realmente el «problema» del dióxido de carbono que la humanidad ha de afrontar.



Los cambios climáticos a que está sometido el mundo representan uno de los enigmas de mayor interés para la ciencia actual.
El autor analiza en este libro las causas y los efectos de los cambios climáticos, y los relaciona con el «efecto invernadero» (la acumulación de CO^2 en la atmósfera, que actúa como un manto y aprisiona el calor, con lo que aumenta la temperatura en la superficie de la Tierra). Esto le lleva a plantear cuál es la incidencia de este fenómeno en la utilización de energía, en la agricultura y en la política de ámbito general y local.
Finalmente, el autor comprueba que, por falta de visión de futuro, la humanidad está destruyendo con sus actividades el equilibrio climático de la Tierra.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria «Science report» de *The Times*. Ha escrito muchos libros, entre los que destacan: *La Tierra en movimiento*, *Génesis*, *En busca del gato de Schrödinger* y *En busca de la doble hélice*, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.